

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Підвищення ефективності корпоративних мереж шляхом
впровадження частотного діапазону 6 ГГц»

Виконав: студент 2-го курсу,
групи ТКС-22м
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

О. Братушко Братушко О.О.

Керівник: д.т.н., професор каф. ІКСТ
Михалевський Д.В.

« 18 » 12 2023 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС
Осадчук В.С.

« 18 » 12 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

Кичак В.М.
д.т.н., проф. Кичак В.М.
« 18 » 12 2023 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань - 17 – Електроніка та телекомунікації

(шифр і назва)

Спеціальність - 172 – Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

“ 19 ” 09 2023 року

З А В Д А Н Н Я **НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Братушко Олексію Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення ефективності корпоративних мереж шляхом впровадження частотного діапазону 6 ГГц

керівник роботи Михалевський Дмитро Валерійович, докт. техн. наук, професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом вищого навчального закладу від “18” 09 2023 року № 247



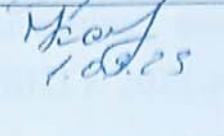
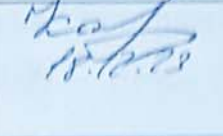
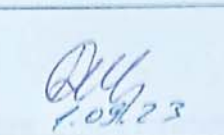

2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи розмір стільника мережі – 156,25 кв.м.; ширина смуги каналу передавання – 20 МГц; розмір інформаційного пакету даних – 2 кБайта; кількість інформаційних пакетів – 100 пакетів/с; затримка оброблення даних – 50 мс; ширина смуги каналу дистанційного керування – 80 МГц; затримка даних каналу дистанційного керування – 8 мс; значення підвищення пропускної здатності мережі при переході з 5 ГГц до 6 ГГц – 2,4 рази.

4. Зміст текстової частини: аналіз функціональних параметрів сучасних безпроводних корпоративних мереж; оцінювання продуктивності WI-FI 6E; розробка та реалізація наборів симуляцій; аналіз результатів проведених досліджень; економічна частина; охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) сегмент топології корпоративної мережі спеціального призначення; схема бездротового поширення сигналів з багатопроменим ефектом; узагальнена модель безпроводного каналу передавання даних; схема моделі системи Wi-Fi; схема розгортання точок доступу та STA в комірці; алгоритм роботи дистанційно керованої робототехнічної мережі.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Михалевський Д.В., професор кафедри ІКСТ	 10.09.23	 18.10.23
Економічна частина	Кавецький В.В. доцент каф. ЕПВМ	 1.09.23	 18.10.23
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Дембіцька С.В. професор кафедри БЖДПБ	 1.09.23	 18.10.23

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	08.09.2023р.	
2.	Аналіз функціональних параметрів сучасних безпроводних корпоративних мереж	17.09.2023р.	
3.	Оцінювання продуктивності WI-FI 6E	06.10.2023р.	
4.	Розробка та реалізація наборів симуляцій	27.10.2023р.	
5.	Аналіз результатів проведених досліджень	10.11.2023р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	17.11.2023р.	
7.	Охорона праці та безпека життєдіяльності	24.11.2023р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини	01.12.2023р.	
9.	Нормоконтроль МКР	04.12.2023р.	
10.	Попередній захист МКР, опонування МКР	08.12.2023р.	
11.	Захист МКР ЕК	11.12.2023р.	

Студент


 (підпис)

Братушко О.О.

Керівник роботи


 (підпис)

Михалевський Д.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.391

Братушко О.О. Підвищення ефективності корпоративних мереж шляхом впровадження частотного діапазону 6 ГГц – магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – Телекомунікаційні системи та мережі – Вінниця: ВНТУ 2023 р. 109 – стор., 34 – рис., 25 – табл., 40 – бібл. – українською мовою.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності корпоративних мереж за рахунок впровадження технології Wi-Fi 6E із врахуванням промислових сценаріїв застосування та частотного діапазону 6 ГГц.

Виконано дослідження особливостей Wi-Fi 6E, промислових бездротових мереж та сценаріїв для розробки гіпотез моделювання та визначення ключових показників ефективності (KPI) для оцінки роботи Wi-Fi 6E.

Виконано розробку та реалізацію комп'ютерних симуляцій мереж Wi-Fi з точки зору метрик додатків та середовища. Виконано аналітичне оцінювання продуктивності Wi-Fi та отримано висновки щодо характеристик Wi-Fi 6E в промислових сценаріях.

Ключові слова: ключовий показник ефективності; точка доступу; автоматизований керований транспортний засіб; службовий блок даних.

ABSTRACT

UDC 621.391

Bratushko O.O. Increasing the efficiency of corporate networks by introducing the 6 GHz frequency band - Master's thesis in speciality 172 - Telecommunications and Radio Engineering, Educational programme - Telecommunication systems and networks - Vinnytsia: VNTU, 2023. 109 p., 34 figs., 25 tables, 40 bibliography - in Ukrainian.

The aim of the qualification work is to increase the efficiency of corporate networks by introducing Wi-Fi 6E technology, taking into account industrial application scenarios and the 6 GHz frequency band.

A study of the features of Wi-Fi 6E, industrial wireless networks and scenarios was carried out to develop modelling hypotheses and determine key performance indicators (KPIs) for evaluating Wi-Fi 6E.

The development and implementation of computer simulations of Wi-Fi networks in terms of application and environment metrics was carried out. An analytical evaluation of Wi-Fi performance is performed and conclusions are drawn regarding the characteristics of Wi-Fi 6E in industrial scenarios.

Keywords: key performance indicator; access point; automated guided vehicle; service data unit.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ СУЧАСНИХ БЕЗПРОВІДНИХ КОРПОРАТИВНИХ МЕРЕЖ.....	12
1.1 Огляд мереж зв'язку на основі технологій Wi-Fi 6 та Wi-Fi 6E	12
1.2 Промислові бездротові мережі	20
1.3 Висновки до розділу 1	27
2 ОЦІНЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ WI-FI 6E.....	29
2.1 Процес дослідження.....	29
2.2 Проектування системи та вимірювання.....	30
2.3 Методи аналізу	33
2.4 Висновки до розділу 2	34
3 РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ НАБОРІВ СИМУЛЯЦІЙ	35
3.1 Розробка імітаційного моделювання.....	35
3.2 Загальні положення процесу моделювання.....	36
3.3 Моделювання періодичного трафіку	38
3.4 Моделювання дистанційно керованих роботів.....	39
3.5 Моделювання співіснування	40
3.6 Моделювання багатостільникової мережі.....	42
3.7 Висновки до розділу 3	44
4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОВЕДЕНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	46
4.1 Моделювання періодичного трафіку	46
4.2 Моделювання дистанційно керованого робота.....	49
4.3 Моделювання співіснування	54
4.4 Моделювання з декількома стільниками.....	60
4.5 Висновки до розділу 4	64
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	65
5.1 Оцінювання наукового ефекту.....	65

	3
5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	68
5.2.1 Витрати на оплату праці.....	69
5.2.2 Відрахування на соціальні заходи	72
5.2.3 Сировина та матеріали.....	72
5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	74
5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт	75
5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт	76
5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень	77
5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей	78
5.2.9 Службові відрядження.....	79
5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	80
5.2.11 Інші витрати.....	81
5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	81
5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи	83
5.4 Висновок до розділу 5.....	84
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	85
6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	86
6.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця	86
6.1.2 Електробезпека приміщення.....	88
6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	89
6.2.1 Мікроклімат	89
6.2.2 Склад повітря робочої зони.....	90
6.2.3 Виробниче освітлення.....	91
6.2.4 Виробничий шум.....	93
6.2.5 Виробничі випромінювання.....	94
6.2.6 Психофізіологічні фактори	95
6.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях	96
6.3.1 Вплив радіації на організм людини.....	96

6.3.2 Розрахунок коефіцієнта протирадіаційного захисту приміщення прийому їжі	98
6.4 Висновки до розділу 6	103
ВИСНОВКИ.....	104
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	106
ДОДАТКИ.....	111
Додаток А ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА	112
Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень	116

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- 3GPP - Проект партнерства 3-го покоління
- AFC - Автоматичне узгодження частоти
- AGV - Автоматизований керований транспортний засіб
- AP - Точка доступу
- BA - Підтвердження блоку
- BEV - Бінарний експоненціальний зворотний зв'язок
- CSMA/CA - Множинний доступ з урахуванням несучої та уникненням колізій
- DCF - Функція розподіленої координації
- DL - Нисхідний канал зв'язку
- EIRP - Ефективна ізотропна випромінювана потужність
- FCC - Федеральна комісія зв'язку США
- GI - Захисний інтервал
- IEEE - Інститут інженерів з електротехніки та електроніки
- InF-DH - Закрита фабрика з щільною заводою та великою висотою базової станції
- IoT - Інтернет речей
- ISM - Промисловість, наука та медицина
- KPI - Ключовий показник ефективності
- MCS - Схема модуляції та кодування
- MIMO - Багатоканальний вхід - багатоканальний вихід
- MPDU - Блок даних протоколу MAC рівня
- MU-MIMO - Багатокористувацький багатоканальний вхід-багатоканальний вихід
- MU-RTS - Багатокористувацький запит на відправлення
- OBSS - Набір базових послуг, що перекривається
- OFDM - Ортогональне мультиплексування з частотним розділенням каналів
- OFDMA - Множинний доступ з ортогональним частотним розділенням каналів
- PHY - Фізичний рівень

PPDU - Одиниця даних протоколу фізичного рівня

QAM - Квадратурна амплітудна модуляція

RU - Блок ресурсів

SDU - Службовий блок даних

STA - Станція

UE - Користувацьке обладнання

UL - Висхідний канал зв'язку

UWB - Ультраширокопосмуговий

WLAN - Бездротова локальна мережа

ВСТУП

Актуальність теми. З наближенням Індустрії 4.0 якість передачі даних в промислових сценаріях стає все більш важливою для підтримки високого рівня автоматизації та інтелекту на заводах. Wi-Fi 6E, новітній вдосконалений стандарт бездротових локальних мереж, має новий неліцензійний спектр 6 ГГц, новий метод доступу під назвою множинний доступ з ортогональним частотним розділенням каналів і ще більше можливостей. Відповідно, Wi-Fi 6E може бути перспективною технологією-кандидатом для промислової бездротової мережі. Для реалізації промислових застосувань Wi-Fi 6E стикається з високими вимогами до зв'язку і великою кількістю пристроїв, які потрібно підтримувати. Оскільки передові системи Wi-Fi 6E практично не отримали широкого розгортання, для оцінки продуктивності Wi-Fi 6E в промислових сценаріях необхідне моделювання [1-3].

На основі симулятора на основі подій від Ericsson ми провели моделювання, що охоплює не тільки сценарії з однією точкою доступу з періодичним трафіком, а й сценарії, в яких співіснують кілька додатків і поколінь систем Wi-Fi. Нарешті, був оцінений промисловий сценарій для великої території із застосуванням частотного планування. На основі результатів моделювання та аналізу ми дійшли висновку, що Wi-Fi 6E добре працює в більшості протестованих нами сценаріїв.

Порівняно із застарілим Wi-Fi 5, Wi-Fi 6E працює краще в умовах перевантаження висхідної лінії зв'язку і є більш придатним для роботи з великою кількістю пристроїв або передачі великої кількості пакетів завдяки своїй унікальній багатокористувацькій можливості доступу. Однак Wi-Fi 6E може мати низьку продуктивність при багатокористувацькій передачі з додатками, які мають складний трафік і вимоги до затримок на мілісекундному рівні. У деяких випадках Wi-Fi 6E працює гірше, ніж Wi-Fi 5, при роботі з декількома додатками, розмір пакетів яких сильно відрізняється. Більше того, зі збільшенням заводських масштабів Wi-Fi 6E може мати значне падіння

продуктивності, майже на 100%, через регуляторні вимоги в новому неліцензованому діапазоні 6 ГГц [4-6].

Аналіз останніх досліджень. Бездротовий зв'язок має на меті забезпечити повсюдний зв'язок для різних сценаріїв використання, в тому числі промислових. З наближенням Індустрії 4.0 [1] для заводів стає все більш важливим гарантувати якість зв'язку, щоб у майбутньому досягти високого рівня автоматизації та інтелекту на заводах. Концепція Індустрії 4.0, визначена як наступна революція в промисловій сфері, описує варіант використання інтелектуальних підключених заводів. Цей варіант використання вимагає підключення не лише стаціонарних машин, датчиків і пристроїв, але й рухомих об'єктів, таких як дрони, мобільні роботи і люди. Бездротові з'єднання на заводах знімають обмеження, пов'язані з кабелями, і допомагають реалізувати більш гнучкі налаштування і високу автоматизацію. Суворі вимоги до технології радіодоступу, що використовується в цих середовищах, є необхідними, оскільки затримка і надійність стають ключовими факторами для життєздатності такого сценарію використання.

Альянс Wi-Fi випустив нову версію Wi-Fi 6E. Wi-Fi 6E успадкував усі функції Wi-Fi 6 [2] і здатний підтримувати більшу кількість користувачів, більшу пропускну здатність, меншу затримку тощо, ніж Wi-Fi 5 [3]. Крім того, нещодавно було розширено неліцензійний спектр у діапазоні 6 ГГц, що загалом становить 1,2 ГГц додаткового спектру в США. Очікується, що з усіма новими функціями і багатими бездротовими ресурсами Wi-Fi 6E перевершить застарілий Wi-Fi і забезпечить гарантовану продуктивність. Іншими словами, Wi-Fi 6E може дозволити індустрії Wi-Fi увійти в сегмент "розумних фабрик".

МКР присвячена тому, чи може Wi-Fi 6E відповідати вимогам промислових додатків в рамках концепції Індустрії 4.0. Якщо бути більш конкретним, ця робота досліджує не тільки те, наскільки добре Wi-Fi 6E може працювати з різними моделями трафіку додатків і вимогами в розроблених промислових сценаріях, а й причини, чому Wi-Fi 6E має певну поведінку в

різних сценаріях. Крім того, щоб бути більш інтуїтивно зрозумілими, ми вивчаємо, як продуктивність Wi-Fi 6E порівнюється з застарілим Wi-Fi 5.

Наше дослідження в МКР полягає в тому, що Wi-Fi 6E перевершує застарілий Wi-Fi і може досить добре підтримувати сценарії використання низької складності, але зі зростанням вимог і масштабу сценаріїв вимоги додатків не можуть бути задоволені.

Актуальність дослідження полягає в необхідності визначення продуктивності та характеристик Wi-Fi 6E в промислових умовах. Будучи передовою бездротовою системою, Wi-Fi 6E не отримав широкого розповсюдження і, як очікується, досягне хорошої продуктивності в промисловому використанні. Тому оцінки та аналіз Wi-Fi 6E за допомогою моделювання можуть слугувати орієнтиром для майбутнього розгляду розгортання систем Wi-Fi 6E у практичних промислових сценаріях.

Мета і завдання роботи. Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності корпоративних мереж за рахунок впровадження технології Wi-Fi 6E із врахуванням промислових сценаріїв застосування та частотного діапазону 6 ГГц.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- дослідження промислових бездротових мереж на всіх етапах - від додатків, що обслуговуються, до фізичного розгортання,
- вивчення особливості та переваг Wi-Fi 6E,
- розроблення та реалізація симуляційних сценаріїв для оцінювання продуктивності Wi-Fi при різних фізичних розгортаннях і роботі промислових додатків,
- аналіз продуктивності Wi-Fi 6E в різних випадках з урахуванням особливостей Wi-Fi 6E.,
- обґрунтування результатів дослідження характеристик Wi-Fi 6E, що виявлені в змодельованих промислових сценаріях.

Об'єктом дослідження є корпоративні мережі діапазону 6 ГГц.

Предметом дослідження є методи дослідження ефективності, надійності та придатності до застосування корпоративних мереж 6 ГГц в конкретному корпоративному середовищі.

МКР базується на дослідженнях і фокусується на новітній системі Wi-Fi 6E, яка нещодавно вийшла на ринок. Наразі Wi-Fi 6E ще не отримав широкого впровадження на практиці, тому ми зосереджуємося на моделюванні та обираємо наступні методології:

1. Концептуальне дослідження особливостей Wi-Fi 6E, промислових бездротових мереж та сценаріїв для розробки гіпотез моделювання та визначення ключових показників ефективності (KPI) для оцінки роботи Wi-Fi 6E.

2. Розробка та реалізація комп'ютерних симуляцій мереж Wi-Fi з точки зору метрик додатків та середовища.

3. Аналітична оцінка продуктивності Wi-Fi та висновки щодо характеристик Wi-Fi 6E в промислових сценаріях.

Методи досліджень базуються на використанні: методи для оцінки та вивчення аспектів функціональності, продуктивності та характеристик мережі; методів моделювання та симуляції різних сценаріїв роботи мережі для оцінки продуктивності та надійності; методи аналізу затримок та кількості втрачених пакетів для визначення якості обслуговування та надійності мережі; методи системного аналізу для прогнозування продуктивності та масштабованості мережі; методи аналізу взаємодії корпоративних мереж 6 ГГц із сусідніми мережами, щоб визначити ефективність спільного використання ресурсів.

МКР фокусується на продуктивності Wi-Fi в приміщенні. Тому ми розробляємо всі сценарії з моделями поширення бездротового зв'язку в приміщенні, регулюванням потужності.

Новизна одержаних результатів:

1. Вперше виконано дослідження особливостей Wi-Fi 6E, промислових бездротових мереж та сценаріїв для розробки гіпотез моделювання та

визначення ключових показників ефективності (КПІ) для оцінки роботи Wi-Fi 6E.

2. Вперше виконано розробку та реалізацію комп'ютерних симуляцій мереж Wi-Fi з точки зору метрик додатків та середовища.

3. Вперше виконано аналітичне оцінювання продуктивності Wi-Fi та отримано висновки щодо характеристик Wi-Fi 6E в промислових сценаріях.

Структура МКР організована наступним чином: У розділі 1 представлена інформація щодо технології Wi-Fi 6E в промислових бездротових мережах. У розділі 2 досліджено методи, що використовуються для оцінки продуктивності Wi-Fi 6E в промислових сценаріях. В розділі 3 здійснено розроблення та реалізацію симуляцій, а відповідні результати моделювання, а також аналіз представлений в розділі 4. У висновках наведені отримані результати в МКР і перспективи подальших досліджень.

Апробація роботи та її основні результати роботи проводилися на Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)» у 2023 році.

1 АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ СУЧАСНИХ БЕЗПРОВІДНИХ КОРПОРАТИВНИХ МЕРЕЖ

У розділі описані основні базові знання про системи Wi-Fi 6E, а також промислові бездротові мережі. Зокрема передбачено ознайомлення з функціями та механізмами Wi-Fi 6E для формування розуміння особливостей експлуатації сучасних промислових бездротових мереж.

1.1 Огляд мереж зв'язку на основі технологій Wi-Fi 6 та Wi-Fi 6E

Технології Wi-Fi 6 і Wi-Fi 6E - це два останніх покоління продуктів Wi-Fi, випущених Wi-Fi Alliance, які поділяють майже всі нові функції стандарту Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) 802.11ax [4, 5].

Однак Wi-Fi 6E є унікальним завдяки своїй здатності працювати в нещодавно затвердженому діапазоні 6 ГГц. Цей новий спектр має пропускну здатність 1,2 ГГц у США, і в найближчому майбутньому Wi-Fi 6E може змінити правила гри.

Спочатку здійснимо порівняльне дослідження Wi-Fi 6 і Wi-Fi 6E, а також їхні нові функції в порівнянні зі стандартом IEEE 802.11ax. Потім ретельно пояснимо технології 802.11ax PHY і OFDMA відповідно. Нарешті, ми представляємо останні правила щодо нового спектру Wi-Fi 6E у діапазоні 6 ГГц.

Технологія Wi-Fi 6, як програма сертифікації стандарту IEEE 802.11ax, є наступним поколінням Wi-Fi, випущеним Wi-Fi Alliance. Wi-Fi 6 призначений для роботи в щільних середовищах, в яких є величезна кількість користувачького обладнання (UE) і щільно розгорнутих точок доступу (AP). Тому метою Wi-Fi 6 більше не є збільшення загальної пропускну здатності, а збільшення пропускну здатності на одиницю площі в щільних середовищах. Проте, масові перешкоди можуть бути основною проблемою погіршення продуктивності через велику кількість UE і повторне використання каналів [2].

З метою підвищення пропускної здатності системи на одиницю площі в умовах високої щільності точок доступу і станцій (STA), цільова група AX (TGax) робочої групи IEEE 802.11 розробила стандарт IEEE 802.11ax. Як показано в таблиці 1.1, стандарт 802.11ax надав Wi-Fi 6 безліч нових функцій, від протоколу фізичного рівня (PHY) до управління живленням. Завдяки новому протоколу PHY номінальна швидкість передачі даних Wi-Fi 6 досягає 9,6 Гбіт/с порівняно з 6,9 Гбіт/с у Wi-Fi 5 (802.11ac). Крім того, ключовою особливістю Wi-Fi 6, ортогональне частотне розділення каналів (OFDMA) робить Wi-Fi 6 краще пристосований для управління одночасним доступом до декількох каналів, що дозволяє зменшити накладні витрати, пов'язані з конфліктами. Крім того, нові функції управління набором базових послуг, що перекриваються (OBSS), та управління живленням також покращують продуктивність Wi-Fi 6 у мережах, що перекриваються, та енергоспоживання пристроїв відповідно.

І останнє, але не менш важливе: випуск Wi-Fi 6E робить Wi-Fi ще більш конкурентоспроможним. Хоча і Wi-Fi 6, і Wi-Fi 6E мають всі ті ж функції, що і 802.11ax, Wi-Fi 6 може працювати тільки в неліцензованому застарілому спектрі 2,4 ГГц і 5 ГГц, де вже є багато пристроїв, які потенційно можуть створювати перешкоди один одному. Wi-Fi 6E розширює доступний спектр до 6 ГГц.

Згідно з новими правилами Федеральної комісії з питань зв'язку США (FCC) [6], для Wi-Fi 6E відкрито діапазон від 5,925 ГГц до 7,125 ГГц. Іншими словами, з'явився вільний діапазон 1,2 ГГц з меншим рівнем перешкод, доступний для планування каналів.

Отже, завдяки новим можливостям стандарту 802.11ax і нещодавно затвердженому неліцензованому спектру, Wi-Fi 6E стане конкурентоспроможним рішенням для бездротових мереж всередині приміщень у промислових сценаріях.

Таблиця 1.1 - Основні характеристики стандарту 802.11ax

	Legacy Wi-Fi features	802.11ax features
PHY		
Spectrum	up to 40 MHz at 2.4GHz (11n) up to 160 MHz at 5 GHz (11ac)	up to 40 MHz at 2.4GHz up to 160 MHz at 5 GHz up to 160 MHz at 6 GHz (Wi-Fi 6E)
OFDM Constellation Order	256-QAM (11ac)	1024-QAM
OFDM Symbol Duration	3.2 μ s	12.8 μ s
OFDM Guard Interval	0.4 or 0.8 μ s (10 or 20% overhead)	0.8, 1.6 or 3.2 μ s (5, 10 or 20% overhead)
MIMO Order	4 (11n), 8 (11ac)	8
Maximal Data Rate	\approx 7 Gbps	\approx 9.6 Gbps
Channel Access		
Basic Channel Access	CSMA/CA	OFDMA on top of CSMA/CA
Random Channel Access	DCF, EDCA	UL OFDMA Random Access on top of CSMA/CA
MU Technology	MU-MIMO (11ac)	MU-MIMO, OFDMA
MU Transmission Direction	DL (11ac)	DL and UL
Fragmentation	Static	Flexible
Aggregation	A-MSDU, A-MPDU (11n) without fragmentation	A-MPDU, A-MSDU with Fragmentation
OBSS Management		
Interference Mitigation	NAV, RTC/CTS, HCCA TXOP Negotiation	Two NAVs, Quiet Period
Spatial Reuse	Sectorization (11ah)	Adaptive Power and Sensitivity Thresholds, Color
Power Management		
Power Management	Many	Enhanced TWT, Enhanced Microsleep

Wi-Fi 6E PHY успадковує мультиплексування з ортогональним частотним розділенням (OFDM) як метод модуляції з багатьма несучими. Однак, враховуючи новий метод доступу до каналу Wi-Fi 6E, TGax збільшує тривалість символу OFDM в 4 рази до 12,8 с. Відповідно, інтервал між піднесучими у Wi-Fi 6E в чотири рази коротший і, таким чином, вчетверо збільшує кількість тонів (сусідніх піднесучих) в каналі, що дозволяє використовувати більш короткі тони для OFDMA, про який мова піде далі. Довші символи OFDM також більш стійкі до міжкористувацького джиттера, притаманного зовнішнім сценаріям. Крім того, завдяки довшим символам, накладні витрати на захисний інтервал (GI) можуть бути зменшені з 12-25% у Wi-Fi 5 до 6% у Wi-Fi 6E [2].

Ще однією новою особливістю Wi-Fi 6E PHY є його нова схема модуляції, а саме 1024-квадратурна амплітудна модуляція (QAM). Як показано на рисунку 1.1, моделюючи різні амплітуди на різних ортогональних сигналах, QAM дозволяє Wi-Fi представляти більше біт на символ OFDM. При хорошій якості зв'язку між точкою доступу і STA, 1024-QAM Wi-Fi 6E теоретично може

досягти 25% приросту пропускної здатності в порівнянні з 256-QAM, що використовується в Wi-Fi 5.

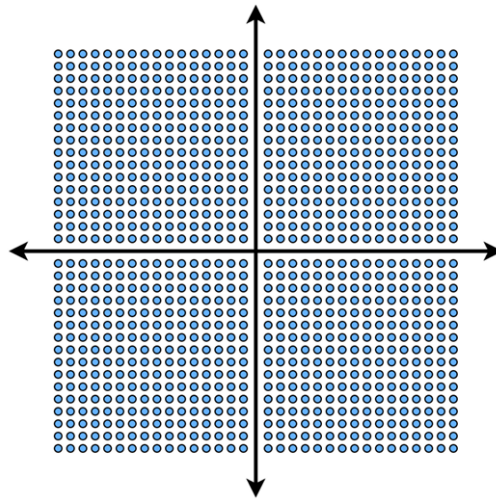


Рисунок 1.1 – 1024 QAM

Технологія OFDMA є однією з ключових функцій, які дозволяють Wi-Fi 6E підвищити продуктивність у місцях щільного розташування пристроїв. Розподіляючи ресурси каналу в часі і частоті, OFDMA як новий метод доступу до каналу дозволяє точці доступу Wi-Fi 6E спілкуватися з декількома STA одночасно. Для порівняння, застарілий Wi-Fi завжди використовує протоколи множинного доступу з урахуванням несучої та уникненням колізій (CSMA/CA) для доступу до каналу [7, 8].

Наприклад, функція розподіленої координації (Distributed Coordination Function, DCF) [9] є фундаментальним методом доступу з використанням CSMA/CA. При використанні протоколу DCF, STA повинен перевірити, чи не зайнятий канал перед передачею повідомлення. Як тільки трапляється колізія, STA виконує алгоритм двійкового експоненціального зворотного зв'язку (БЕВ) [10]. Завдяки механізму БЕВ, це може призвести до тривалих затримок при багаторазових зіткненнях.

Розроблений TGax, стандарт 802.11ax OFDMA дозволяє одночасну передачу даних за допомогою декількох STA. Розділяючи ресурси каналу, а

саме тони, на різні одиниці ресурсів (RU), точка доступу Wi-Fi 6E може призначити кожному STA відповідну RU, в якій відбувається подальша передача.

За однакової якості з'єднання, чим більший розмір призначеного RU, тим більша пропускна здатність користувача. На рисунку 1.2 показано можливі розподіли RU в каналі 20 МГц, а в таблиці 1.2 показано всі доступні розміри RU і максимальну кількість RU в різних каналах.

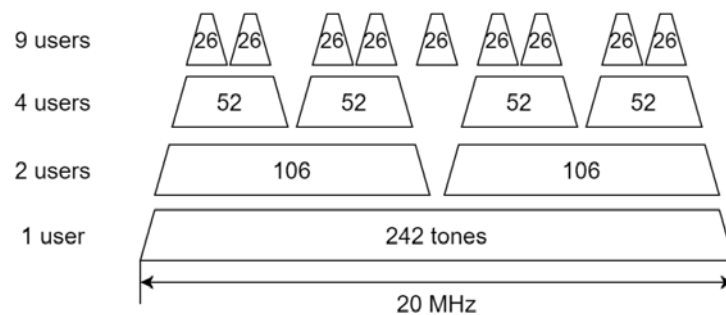


Рисунок 1.2 – Блок ресурсів в каналі 20 МГц

Таблиця 2.2 - Максимальна кількість ресурсних блоків в різних каналах

RU size	20 MHz	40 MHz	80 MHz	160 MHz
26-tone	9	18	37	74
52-tone	4	8	16	32
106-tone	2	4	8	16
242-tone	1	2	4	8
484-tone	NA	1	2	4
996-tone	NA	NA	1	2

Завдяки можливості розподіляти ресурси каналу для STA, 802.11ax метод OFDMA може організовувати багатокористувацькі (MU) передачі як у висхідному (UL), так і у низхідному (DL) каналах на основі кожного кадру. Щоб вирівняти тривалість передачі в кожному RU в межах кадру, точки доступу і STA можуть використовувати заповнення в кадрах, які вимагають меншого часу передачі, або об'єднувати коротші кадри в інші кадри. Крім того,

802.11ax OFDMA може також фрагментувати великі кадри, щоб зменшити розмір покадрової передачі MU [12].

Далі ми детально розглянемо, як працює 802.11ax OFDMA в DL і UL відповідно в сценарії з однією точкою доступу і незайнятим каналом. Оскільки для передачі 802.11ax OFDMA потрібен ряд нових кадрів, в таблиці 2.3 представлені їх назви, напрямки і функціональні можливості.

Таблиця 2.3 - Кадри та функції OFDMA

Кадр	Напрямок	Функціональні можливості
MU-RTS	DL	Інформування про початок передачі.
MU-CTS	UL	Інформування про готовність передачі.
BSRP	DL	Визначення стану буфера STA.
BSR	UL	Повідомлення про стан буфера STA.
Trigger	DL	Початок передачі даних UL.
BA	DL/UL	Синхронне підтвердження відправника.

Рисунок 1.3 ілюструє процес передачі одного DL OFDMA. На початку точка доступу може прийняти необов'язковий багатокористувацький запит на передачу (MU-RTS)/Багатокористувацьке підтвердження на передачу (MU-CTS) [13]. Підтвердження рекомендується для довгих передач, щоб уникнути проблеми прихованих вузлів [14]. Замість цього точка доступу починає передачу DL OFDMA, спочатку виділяючи RU цільовим STA і об'єднуючи всі дані DL в один кадр MU для передачі. Потім STA повертають синхронізоване блокове підтвердження (BA) для завершення передачі DL OFDMA.

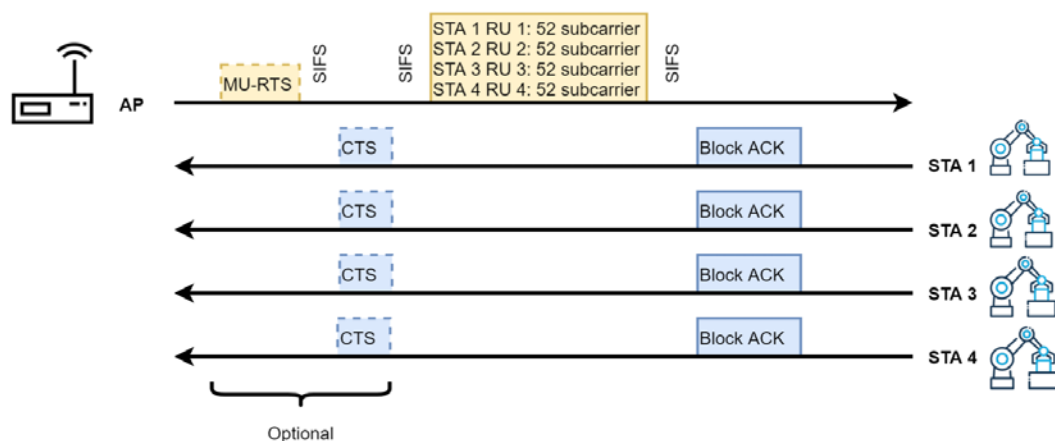


Рисунок 1.3 – Структура процесу передачі DL OFDMA

Організація передачі UL OFDMA є більш складною. З огляду на оперативність, точка доступу виділяє ресурс тільки тим STA, які мають дані для передачі. Таким чином, спочатку точка доступу надсилає опитування Buffer State Report Polling (BSRP) до всіх STA. У відповідь STA повертають свій звіт про загальний стан (BSR) так, щоб точка доступу була поінформована про загальний стан усіх STA, а потім вирішила, які STA запланувати для наступної передачі UL MU. Потім точка доступу передає спеціальний тригерний кадр через передачу DL MU, щоб запуснути передачу UL MU. Наприкінці передачі UL OFDMA точка доступу передає BA до STA.

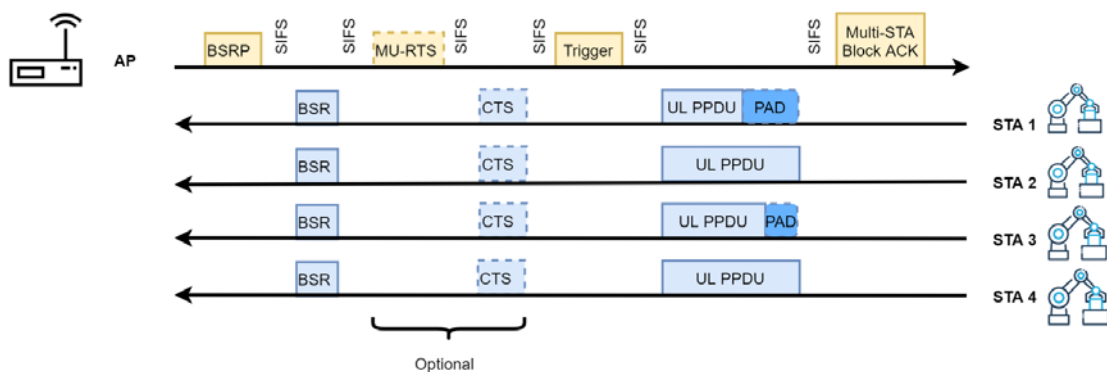


Рисунок 1.4 – Структура процесу передачі даних UL OFDMA

Для відстеження UL точка доступу Wi-Fi 6E може безпосередньо запускати відстеження UL, якщо вона вже поінформована про стан буфера. В особливому випадку, коли в системі є трафік, час прибуття якого відомий точкам доступу Wi-Fi 6E, ми припускаємо, що ідеальний планувальник може дозволити точці доступу запуснути трафік UL з тригерним кадром одразу після того, як дані будуть готові до передачі. В результаті, STA більше не потрібно чекати на періодично відправлений BSRP перед передачею кадрів даних UL.

Отже ми представили майже всі нові функції, за винятком останньої, ексклюзивної для Wi-Fi 6E, - нового неліцензованого спектру на частоті 6 ГГц. Цей новий діапазон є єдиною відмінністю між Wi-Fi 6 і Wi-Fi 6E, але він має можливість зробити Wi-Fi 6E кардинально новим у промислових сценаріях.

З ростом популярності систем Wi-Fi все більше пристроїв працюють у неліцензійних діапазонах. Як наслідок, іноді занадто багато пристроїв працюють в обмежених бездротових ресурсах, що призводить до перешкод і конкуренції, що створює проблему для задоволення високих вимог до зв'язку в промислових додатках. Навіть якщо використовується весь діапазон 2,4 ГГц або 5 ГГц, бездротових ресурсів все одно може бути недостатньо для величезної кількості пристроїв на заводах.

Сьогодні в кількох регіонах і країнах світу спостерігається неліцензійне використання діапазону 6 ГГц. Серед країн, що використовують діапазон 6 ГГц, Сполучені Штати володіють найбільш широким спектром каналів. Згідно з новим положенням FCC [6], смуга 1,2 ГГц від 5,925 ГГц до 7,125 ГГц дозволена для неліцензійного використання. Як показано на рисунку 1.5, нова смуга в 15 разів і в 2,4 рази більша за смуги 2,4 ГГц і 5 ГГц відповідно, а отже, вона може містити більше каналів різного розміру, ніж старі смуги.

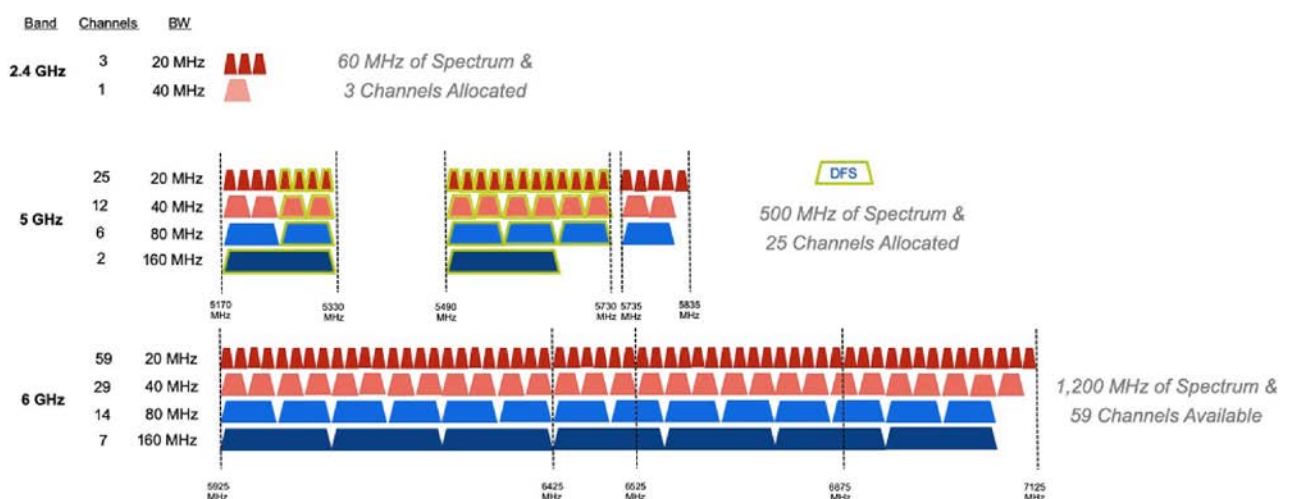


Рисунок 1.5 – Розподілення частотного ресурсу Wi-Fi 6E

Іншим важливим регулюванням у діапазоні 6 ГГц є обмеження потужності пристроїв у системах Wi-Fi 6E. FCC дозволяє два різних класи пристроїв: пристрої зі стандартною потужністю та пристрої з низьким енергоспоживанням для використання всередині приміщень. Пристрої зі стандартною потужністю вимагають використання системи автоматичної частотної координації (AFC), щоб знаходити діючих операторів у каналах, тоді як малопотужні пристрої призначені для використання всередині приміщень з меншою потужністю передачі порівняно з пристроями зі стандартною потужністю і можуть бути розгорнуті на будь-якому каналі без урахування діючих операторів. У таблиці 1.4 наведено обмеження потужності пристроїв, що працюють у новому діапазоні 6 ГГц, встановлені FCC.

Таблиця 2.4 - Обмеження потужності FCC для неліцензійного використання в діапазоні 6 ГГц

Клас пристроїв	Максимальне значення EIRP	Максимальна спектральна щільність потужності EIRP
Точка доступу зі стандартним живленням (з керуванням AFC)	36 dBm	23 dBm/MHz
Клієнт підключений до стандартного живлення Точка доступу	30 dBm	17 dBm/MHz
Точка доступу з низьким енергоспоживанням (лише для приміщень)	30 dBm	5 dBm/MHz
Клієнт підключений до малопотужної точки доступу	24 dBm	-1 dBm/MHz

1.2 Промислові бездротові мережі

Зв'язок через промислові мережі зараз необхідний на більшості заводів для управління обладнанням, моніторингу навколишнього середовища та інших цілей. Хоча більшість промислових пристроїв в даний час підключені до

мережі через дротову інфраструктуру, стрімкий розвиток бездротових мереж зробив можливим впровадження промислових бездротових мережевих рішень на заводах. Кваліфікована промислова бездротова мережа повинна відповідати високим вимогам до зв'язку в промислових додатках, а також враховувати унікальне середовище поширення радіохвиль на заводі.

У цьому підрозділі ми почнемо з огляду промислових бездротових мереж на заводах. Потім ми представимо вимоги до додатків і покажемо деякі загальні шаблони трафіку промислових додатків. Нарешті, ми коротко представимо середовище поширення бездротового сигналу і кілька моделей внутрішніх каналів для промислових сценаріїв.

Для промислових сценаріїв всередині приміщень промислова бездротова мережа може бути бездротовою локальною мережею (WLAN), що обслуговує промислове виробництво. Для управління зв'язком промислових додатків промислові бездротові мережі успадковують високі вимоги до дротових промислових мереж, такі як висока надійність, низька затримка і т.д. Крім того, оскільки промислові бездротові мережі розгортаються всередині приміщень, необхідно також враховувати унікальне середовище поширення бездротових з'єднань.

Крім того, з розвитком Індустрії 4.0 і подальшим акцентом на передову автоматизацію та інтелект, в промислових бездротових мережах з'явилися нові технології та суб'єкти. На рисунку 1.6 показані основні компоненти Індустрії 4.0. Прикладний рівень складається з усіх додатків, які відповідають за автоматизацію виробництва, координацію системи, збір даних тощо. На мережевому рівні цим процесом керують різні мережеві технології з їх унікальними перевагами - конфіденційністю, безпекою, гнучкістю та іншими перевагами. Нарешті, на заводах з'являються нові фізичні об'єкти, в тому числі мобільні пристрої, такі як дрони або телефони, смарт-пристрої, такі як автоматизовані керовані транспортні засоби (AGV), або велика кількість датчиків Інтернету речей (IoT).

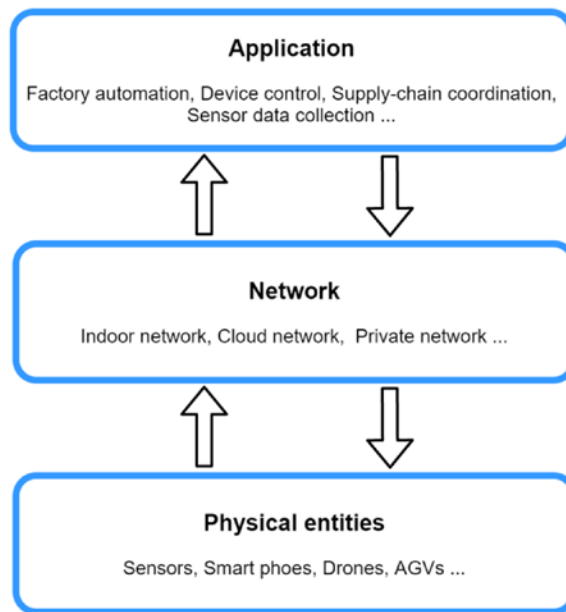


Рисунок 1.6 – Рівні корпоративних мереж

На рисунку 1.7 наведено топологію корпоративної бездротової мережі на заводі. Як показано на рисунку, корпоративна бездротова мережа є частиною всієї промислової мережі, тільки між бездротовими точками доступу і фізичними об'єктами. У такій мережі пакети прикладного рівня спочатку генеруються в додатках, які працюють в загальних кремнієвих матрицях.

Потім ці пакети передаються через дротову магістраль Ethernet.

Залежно від характеристик різних підприємств, промислові бездротові мережі в деяких випадках використовуються для підтримки пристроїв, які вимагають мобільності або мають відносно щадний режим роботи. На противагу цьому, дротові промислові мережі забезпечують гарантований зв'язок для пристроїв з найбільш критичними умовами експлуатації.

Незважаючи на переваги гнучкості, одна з проблем промислових бездротових мереж полягає в тому, чи можуть сучасні вдосконалені бездротові мережі забезпечити якісний зв'язок, оскільки вимоги до зв'язку в промислових сценаріях є більш суворими, ніж в інших.

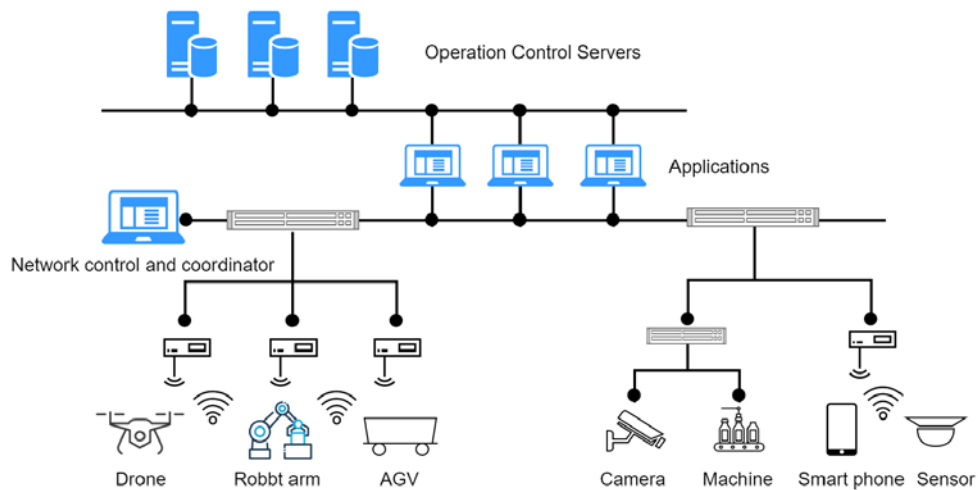


Рисунок 1.7 – Сегмент топології корпоративної мережі спеціального призначення

Оскільки промислові бездротові мережі призначені в першу чергу для підтримки промислових додатків, програми, що працюють на бездротових мережах, повинні бути виділені серед всіх додатків на заводах. Однак, на жаль, не існує достатньої кількості досліджень додатків в промислових бездротових системах. Дослідження проекту Flexible Factory Project [17, 18] проілюструвало різноманітність бездротових додатків на промислових об'єктах. Як показано в таблиці 1.5, ці програми поділяються на шість категорій відповідно до їх цілей.

Залежно від призначення, програми можуть мати суворі вимоги до зв'язку, які повинна задовольняти бездротова мережа. Наприклад, управління прецизійними виробничими машинами може бути дуже чутливим до затримок зв'язку, в той час як відеомоніторинг може вимагати значної пропускної здатності. У [16] визначено три ключові цілі щодо вимог до бездротової мережі в Індустрії 4.0, а саме: затримка, довговічність і надійність.

Додатки в IEEE 802 Nendica Report [17] також характеризуються своїми моделями трафіку та щільністю розгортання. Моделі трафіку даних додатків описуються розміром даних і частотою генерації даних, які мережа повинна обробляти для кожного додатка.

Таблиця 1.5 - Категорії бездротових додатків

Категорія	Опис	Призначення заявок у межах категорії
Контроль обладнання	Надсилання команд мобільним транспортним засобам, виробничому обладнанню та отримання інформації про їхній стан	Управління та експлуатація виробничого обладнання, допоміжного обладнання
Моніторинг якості	Збір інформації, пов'язаної з продукцією та станом машин під час виробництва	Перевірка того, що матеріал виробляється з правильною точністю Перевірка того, що виробництво відбувається за правильною процедурою і в належному стані
Менеджмент ресурсів корпорації	Збір інформації про те, чи відбувається виробництво в належних екологічних умовах, а також про те, чи належним чином здійснюється управління персоналом і речами, що сприяють підвищенню продуктивності.	Перевірка того, що виробниче середовище (наприклад, відповідно до таких факторів, як температура, тиск і т.д.) управляється належним чином Контроль за переміщенням людей і речей Перевірка стану обладнання та перевірка запасів матеріалів, дрібного обладнання та інструментів Моніторинг стану технічного обслуговування обладнання під час роботи Належний облік роботи та стану виробництва
Відображення	Для працівників - отримання необхідної допоміжної інформації для менеджерів - моніторинг виробничого процесу та стану виробництва	Надання відповідної робочої підтримки, наприклад, інструкцій та інформації для відстеження Візуальне відображення того, чи проходить процес без затворів або затримок, порушень у виробництві Візуальне відображення стану виробництва, виробничого графіка, а також будь-яких відхилень або операційних порушень
Охорона праці	Збір інформації про небезпеки для працівників	Забезпечення безпеки співробітників
Інші	Комунікаційна інфраструктура неспецифічного призначення	Випадки, відмінні від вищезазначених

Щільність розгортання показує, скільки додатків потрібно розгорнути в межах стандартної області, яку також можна розглядати як щільність об'єктів, які точки доступу повинні підтримувати на одну область. У таблиці 1.6

наведено кілька додатків зі звіту IEEE 802 Nendica Report [17] з їхніми вимогами. Інший цікавий варіант реального промислового застосування, прототип контролю якості, розроблений для текстильного процесу за допомогою обробки зображень, можна знайти в аналізі продуктивності 802.11n [19], також відомого як Wi-Fi 4, в [20].

Таблиця 1.6 - Аналіз промислових бездротових застосувань і технічних вимог

Wireless applications		Communication Requirements			
Category	Purpose	Deployment density (<i>node/m²</i>)	Packet size (Byte)	Packet rate (packet / s)	Delivery time tolerance (ms)
Equipment Control	Control of liquid injection	$2.5 * 10^{-3}$	64	$\frac{1}{60}$	100
Equipment Control	AGV control	$2.5 * 10^{-3}$ to $2.5 * 10^{-2}$	100	$\frac{1}{60}$	100
Quality Supervision	Sensing for managing air conditioning	$2.5 * 10^{-3}$	64	1	60000
Factory Resource Management	Work record text	$2.255 * 10^{-2}$	100	$\frac{1}{60}$	1000
Human Safety	Detecting dangerous operations	$2.5 * 10^{-3}$	6K	10	1000

Деякі промислові застосування мають суворі вимоги, як показано в таблиці 1.6. Однак суворе радіосередовище на заводах може ще більше ускладнити роботу бездротових мереж у цих застосуваннях. У промислових сценаріях висока ймовірність того, що металеві машини розташовані щільно і, таким чином, блокують або відбивають бездротові сигнали. Крім того, може бути багато рухомих об'єктів, таких як транспортні засоби, рухомі механізми або робітники на заводах. Разом ці об'єкти можуть призвести до багатопроменевих ефектів, як показано на рисунку 1.8. Тому для моделі промислового каналу в приміщенні необхідно враховувати як великомасштабні, так і дрібномасштабні ефекти завмирання.

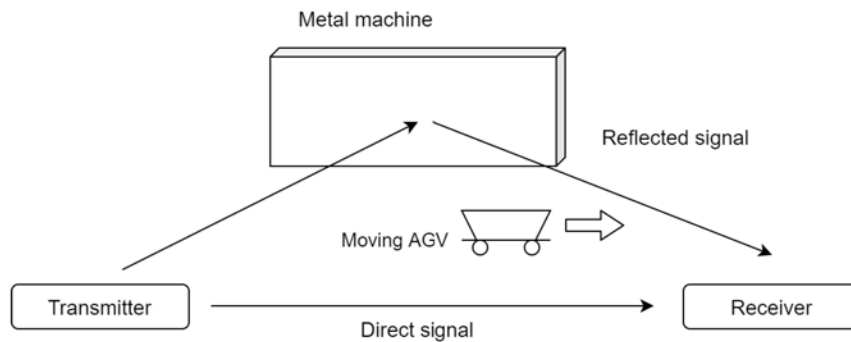


Рисунок 1.8 – Схема бездротового поширення сигналів з багатопроменевим ефектом

Огляд компонентів моделі каналу для промислових приміщень наведено в [21]. Як показано на рисунку 1.9, модель каналу складається не тільки з великомасштабних завмирань, включаючи втрати на шляху і затінення, але також містить дрібномасштабні завмирання разом з частотною вибірковістю, просторовою кореляцією, часовою кореляцією і статистикою завмирань.

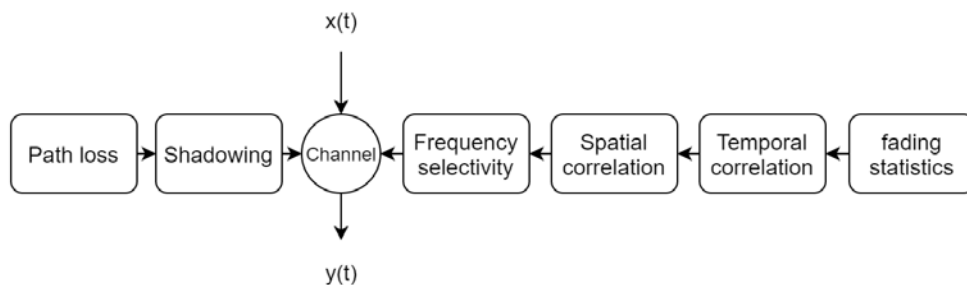


Рисунок 1.9 – Узагальнена модель безпроводного каналу передавання даних

Хоча модель каналу для промислового середовища в приміщенні вимагає ретельних вимірювань і моделювання декількох компонентів моделі каналу, існує ряд корисних моделей промислових каналів в приміщенні.

Комплексне дослідження промислових каналів поширення надширокопasmового (UWB) зв'язку в приміщенні виконано в [22]. Масштабні завмирання та часові характеристики промислового радіоканалу на частотах

900, 2400 та 5200 МГц визначено в [23]. В [21] розроблено емпіричну модель каналу для промислових приміщень для передавання в діапазоні 5 ГГц для промислових, наукових та медичних цілей (ISM). Набір моделей каналів моделей каналів всередині заводських приміщень, які орієнтовані на заводські цехи різного розміру і з різним рівнем щільності зашарашеності, представлені в [24].

1.3 Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено аналіз мережі Wi-Fi 6E, яка є розширенням стандарту Wi-Fi 6, та використовує новий діапазон частот у 6 ГГц. Основним відмінником Wi-Fi 6E є використання нового діапазону 6 ГГц, що дозволяє отримати додаткові несперечені канали для передачі даних. Підтримка широкосмугового каналу забезпечує високу пропускну здатність і покращену ефективність мережі.

Використання технології Multi-User, Multiple Input, Multiple Output (MU-MIMO) дозволяє одночасно обслуговувати кілька пристроїв, що поліпшує ефективність передачі даних. OFDMA дозволяє ефективно використовувати канали для передачі коротших блоків даних, що особливо важливо для підтримки великої кількості підключених пристроїв.

Механізм BSS Coloring допомагає зменшити взаємний вплив сусідніх мереж, що покращує якість зв'язку. Wi-Fi 6E забезпечує високу швидкість передачі даних, що робить його ідеальним для промислових застосувань з високим обсягом даних, таких як відеоспостереження, обробка великих обсягів інформації тощо.

Використання широкосмугових каналів та технології OFDMA дозволяє зменшити затримку в передачі даних, що важливо для реального часу у промислових процесах. MU-MIMO та інші технології підвищують підтримку одночасно підключених пристроїв, що особливо важливо для мереж інтернету речей (IoT) у промисловості. Механізми BSS Coloring і інші нововведення

допомагають поліпшити надійність мережі та забезпечити високий рівень безпеки. BSS Coloring дозволяє зменшити взаємний вплив між сусідніми мережами, що особливо важливо у промислових зонах з великою щільністю мереж. Загалом, Wi-Fi 6E відкриває нові можливості для покращення продуктивності та ефективності промислових бездротових мереж, забезпечуючи велику пропускну здатність і надійність зв'язку.

2 ОЦІНЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ WI-FI 6E

У даному розділі ми представляємо методологію, яку ми використовуємо для оцінювання продуктивності Wi-Fi 6E в промислових сценаріях. В підрозділі 3.1 наведено огляд методів, які ми використовували в процесі дослідження. Потім ми описуємо наші методи моделювання та аналізу в підрозділах 3.2 і 3.3 відповідно.

2.1 Процес дослідження

У підрозділі пояснюється процес дослідження запланованого проекту. Для кращого розуміння нашого проекту спочатку виконується концептуальне дослідження літератури про системи Wi-Fi 6E і промислові бездротові мережі. На основі вивчення літератури розробляються різні симуляції продуктивності Wi-Fi, які потім проводяться для остаточної оцінки та аналізу продуктивності Wi-Fi 6E.

Для того, щоб провести оцінку продуктивності Wi-Fi 6E в промислових сценаріях, необхідно вивчити літературу як про сам протокол Wi-Fi, так і про промислові сценарії та вимоги до промислового застосування.

Для Wi-Fi 6E ми вивчаємо його унікальні особливості, щоб зрозуміти переваги і потенціал Wi-Fi 6E, що необхідно для висунення гіпотез в наступних моделюваннях.

Що стосується промислових бездротових мереж і сценаріїв, ми досліджуємо промислові додатки з точки зору їх моделей трафіку і вимог, щоб розробити KPI для продуктивності бездротової мережі. Крім того, дуже важливо дослідити промислове середовище для проектування фізичного розгортання в симуляціях.

На основі результатів дослідження літератури ми розробили і реалізували симуляції від простих сценаріїв до комплексних. У простих сценаріях ми тестуємо відносно прості моделі трафіку з однією точкою доступу. Потім, у

складних випадках, ми враховуємо складні моделі трафіку, збільшуємо кількість точок доступу і враховуємо міжстільникові завади. За допомогою цих результатів моделювання ми отримуємо розуміння продуктивності Wi-Fi 6E і перевіряємо наші гіпотези.

Нарешті, ми заглибилися в результати моделювання, проаналізувавши пакети на прикладному, MAC і фізичному рівнях, щоб з'ясувати, чому особливості Wi-Fi 6E призводять до різної продуктивності. Насамкінець ми робимо висновок про продуктивність і характеристики Wi-Fi 6E, які ми виявили в промислових сценаріях.

2.2 Проектування системи та вимірювання

У підрозділі ми вперше представляємо модель системи Wi-Fi, на основі якої виконуються різноманітні симуляції для тестування продуктивності Wi-Fi в різних сценаріях. Крім того, розроблено та пояснено KPI після розгляду вимог промислового застосування.

Всі симуляції базуються на системному симуляторі Ericsson, заснованому на подіях. Для пост-обробки використовується MATLAB для обробки журналів, а Graphviz та Python - для побудови графіків.

Модель системи Wi-Fi є лише частиною промислової мережі. Точки доступу Wi-Fi з дротовою магістраллю Ethernet логічно розгортаються на межі мережі і взаємодіють з декількома фізичними об'єктами. Тому в нашій системі Wi-Fi ми спрощуємо частину мережевої координації і зосереджуємося лише на прикладному рівні, MAC-рівні, фізичному рівні, поширенні сигналу, а також на фізичному розгортанні промислових об'єктів.

На рисунку 2.1 показано спрощену схему запропонованої моделі системи Wi-Fi. У симуляторі як точки доступу, так і STA містять всю структуру зв'язку від прикладного до фізичного рівня. На прикладному рівні кожен додаток характеризується своєю моделлю трафіку. Відповідно до параметрів моделі трафіку, розмір пакета і швидкість генерації пакетів встановлюються таким

чином, щоб точка доступу і STA передавали або приймали пакети відповідно до шаблонів трафіку.

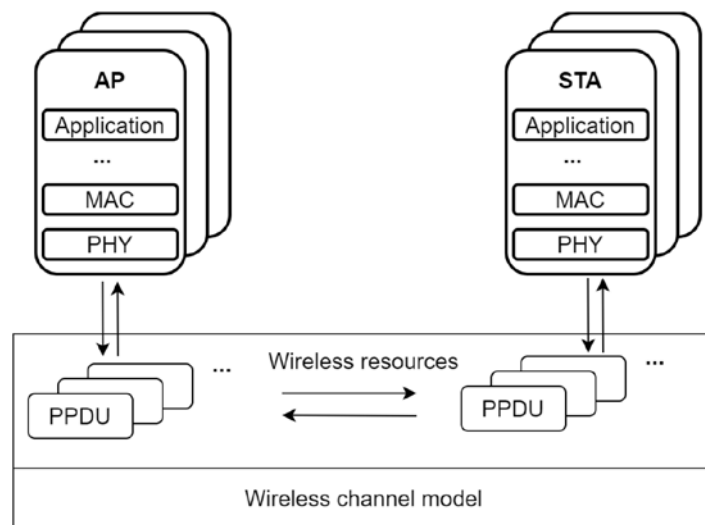


Рисунок 2.1 – Схема моделі системи Wi-Fi

На рівні MAC різні методи доступу до каналу та стратегії планування приймаються відповідно до змодельованої версії Wi-Fi. Потім фізичний рівень створює одиниці даних протоколу фізичного рівня (PPDU) відповідно до одиниць даних протоколу рівня MAC (MPDU), беручи на себе контроль над кодуванням, модуляцією, розміщенням тонів тощо. Нарешті, для поширення сигналу і розгортання пристрою ми вибираємо відповідну модель каналу і налаштовуємо кількість, положення, обмеження потужності передачі і т.д. як для точок доступу, так і для STA.

Коли система Wi-Fi слугує промисловою бездротовою мережею, її кінцевою метою є задоволення вимог кожного промислового додатку та підтримка достатньої кількості пристроїв, що працюють з різними промисловими додатками.

Тому в якості KPI систем Wi-Fi обрано кількість підтримуваних STA з вимогами конкретного додатку. Відповідно до літературного дослідження вимог промислових застосувань, кількість підтримуваних STA залежить від

вимог до затримки та надійності кожного застосування. Чим більше STA може підтримувати система Wi-Fi, тим більше пристроїв може працювати на заводі.

Як базова продуктивність, затримка являє собою час, витрачений на доставку пакета між прикладними рівнями точки доступу і STA. У симуляторі затримка вимірюється від одного відправника, що передає пакет додатків, до відповідного одержувача, який отримує той самий пакет. Пакет заявки може бути фрагментованим, тому затримка вимірюється, коли отримано весь пакет заявки. Затримка пакету завжди пов'язана з толерантністю до затримки відповідної програми.

На основі вимірювання затримки надійність роботи програми в парі AP і STA визначається як відношення кваліфікованих пакетів до загальної кількості пакетів, переданих за певний проміжок часу, що показано в рівнянні 2.1. Кваліфіковані пакети - це пакети, які успішно прийняті в межах допуску на затримку, визначеного для конкретної програми. Зауважте, що надійність вимірюється не для всієї системи, а для кожного користувача, який запускає програму.

$$\begin{aligned}
 \text{Reliability} &= \frac{\text{Nr of packets qualified}}{\text{Nr of packets transmitted}} \cdot 100\% \\
 &= \left(1 - \frac{\text{Nr of packets latency} \geq \text{latency tolerance} + \text{Nr of packets lost}}{\text{Nr of packets transmitted}} \right) \cdot 100\%
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Нарешті, з урахуванням визначеної продуктивності, наш KPI відображає максимальну кількість користувачів, яку може підтримувати поточна система Wi-Fi, зберігаючи при цьому найгіршу продуктивність користувача для забезпечення необхідної надійності. Наприклад, система Wi-Fi 6E може підтримувати максимум 30 машин з надійністю не менше 99% на кожен машину. Змінюючи конфігурацію системи Wi-Fi та параметри трафіку, ми можемо порівнювати цей KPI, щоб зрозуміти вплив різних факторів на продуктивність Wi-Fi.

2.3 Методи аналізу

Оскільки проект базується на дослідженнях, дуже важливо використовувати правильні методи аналізу, щоб допомогти оцінити продуктивність Wi-Fi і вивчити характеристики Wi-Fi.

Тому спрямовані графіки використовуються для наочної ілюстрації продуктивності різних систем Wi-Fi в промислових сценаріях, в той час як аналіз кадрів і PPDU проводиться для кращого спостереження за обміном пакетами на MAC- і фізичному рівнях і подальшого аналізу.

Оскільки ми тестуємо продуктивність Wi-Fi з багатьма різними параметрами в системі Wi-Fi, моделі трафіку і середовищі, ми використовуємо орієнтовані графи для порівняння продуктивності, щоб проілюструвати, як різні параметри призводять до зміни продуктивності.

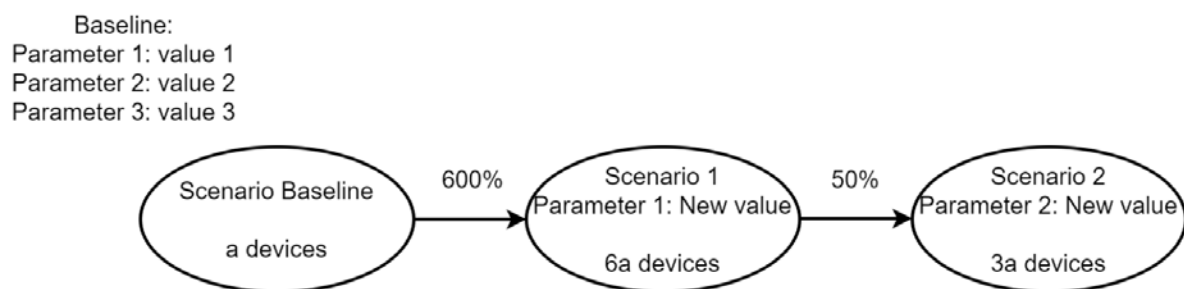


Рисунок 2.2 - Приклад орієнтованого графа

Спрямовані графи складаються з двох елементів - вузлів і стрілок. На рисунку 2.2 показано приклад нашого орієнтованого графа. Вузли представляють різні сценарії, в той час як стрілки показують зміну продуктивності між пов'язаними сценаріями. Спрямовані графи завжди починаються з базового вузла, крім якого ми перераховуємо всі налаштування параметрів для представлення базового сценарію. Потім у вузлі, пов'язаному з базовою лінією, спочатку показується змінений параметр і його нове значення у верхній частині вузла, що означає, що тільки цей параметр змінюється порівняно з попереднім вузлом, а інші залишаються незмінними.

Кожен вузол також показує KPI внизу, наприклад, максимальну кількість підтримуваних пристроїв.

Що стосується порівняння між різними сценаріями, то стрілка, що з'єднує два вузли, показує, як KPI вузла, що знаходиться в голові стрілки, порівнюється з вузлом, що знаходиться в хвості стрілки. Наприклад, ліва стрілка показує, що KPI Wi-Fi у другому вузлі становить 600% від KPI першого вузла. Завдяки використанню як вузлів, так і стрілок, спрямовані діаграми можуть уникнути повторення одних і тих же параметрів і наочно показати порівняння продуктивності в різних сценаріях.

Оскільки нові функції Wi-Fi 6E в основному стосуються MAC і фізичного рівнів, ми розглянемо кадри MAC, а також PPDU для аналізу стану трафіку.

MAC-кадр дозволяє нам візуалізувати механізм перемикання кадрів в різних протоколах доступу, колізії, час повернення і т.д. У той же час, PPDU показує всі деталі передачі на фізичному рівні, включаючи розподіл каналних ресурсів, тривалість передачі кожного користувача на конкретному каналі, рівень прийнятого сигналу, індекс модуляції та кодування (Modulation and Coding Scheme, MCS).

2.4 Висновки до розділу 2

У другому розділі проведено оцінювання продуктивності Wi-Fi 6E в промислових сценаріях при якому важливо враховувати різні аспекти, такі як пропускна здатність, стійкість до перешкод, керування ресурсами та інші параметри. Разом з тим, загальна методологія, яку можна використовувати для такого оцінювання: визначення вимог сценарію; обрання метрик продуктивності; моделювання топології мережі; сценарії тестування; використання спеціальних інструментів; аналіз результатів; оптимізація та покращення. Використана методологія дозволяє систематично оцінювати продуктивність Wi-Fi 6E в промислових умовах та забезпечувати оптимальну роботу мережі в даному середовищі.

3 РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ НАБОРІВ СИМУЛЯЦІЙ

У розділі пояснюється розробка та реалізація чотирьох наборів симуляцій, а саме: симуляції періодичного руху, симуляції дистанційно керованих роботів, симуляції співіснування та симуляції багатокоміркової мережі.

3.1 Розробка імітаційного моделювання

Оскільки метою моделювання є перевірка продуктивності систем Wi-Fi 6E в різних промислових сценаріях, ми хотіли б врахувати фактори, що призводять до зміни продуктивності Wi-Fi, включаючи параметри трафіку додатків, конфігурацію системи Wi-Fi тощо. Крім того, системи Wi-Fi на заводах сильно відрізняються. Масштабна система Wi-Fi може містити кілька точок доступу з повторним використанням каналів, що вимагає подальшого розгляду питань планування спектру та боротьби за нього. Деталі чотирьох наборів симуляцій описані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Розроблені симуляції та їх цілі

Simulation	Type	Purpose
Periodic traffic simulations	Single-AP	To test Wi-Fi performance with various periodic industrial application traffic.
Remotely-controlled robot simulations	Single-AP	To explore if Wi-Fi 6E can handle high requirement applications.
Coexistence simulations	Single-AP/ Multi-AP	To test Wi-Fi 6E performance with coexistence of applications and coexistence of Wi-Fi systems.
Multi-cell simulations	Multi-AP	To operate frequency planning with entire Wi-Fi bands and test Wi-Fi 6E performance with channel reuse.

Для того, щоб поступово оцінити продуктивність Wi-Fi 6E в різних промислових сценаріях, ми розробили чотири набори симуляцій, що розглядають простий періодичний трафік і складний трафік, а також

охоплюють ідеальні сценарії з однією точкою доступу і сценарії з декількома точками доступу на великих територіях.

3.2 Загальні положення процесу моделювання

Моделювання має спільні риси в конфігураціях Wi-Fi, бездротових ресурсах, моделях бездротових каналів і фізичному розміщенні пристроїв. Щодо конфігурацій систем Wi-Fi, то системи Wi-Fi 6E можуть мати два типи планувальників, а саме: ідеальний планувальник і планувальник BSRP. Точка доступу Wi-Fi 6E з ідеальним планувальником може планувати роботу STA, як тільки STA з'являється в її буфері. У той час як з планувальником BSRP, STA повинні чекати на періодично переданий BSRP, щоб повідомити про стан буфера, перш ніж передавати кадр UL.

Що стосується бездротових ресурсів, то всі симуляції проводяться в діапазоні 5 ГГц або 6 ГГц. Ми знехтували діапазоном 2,4 ГГц через його обмежену пропускну здатність і сильні суперечки в практичному використанні. Ми обрали 3GPP з щільною завадою і високою висотою базової станції (InF-DH) в якості моделі бездротового каналу, оскільки ця модель спеціально розроблена для сценаріїв закритого заводу з щільною завадою і великою висотою базових станцій, що добре відповідає нашим цільовим сценаріям моделювання.

Що стосується фізичного розгортання, то моделювання базується на основі стільників, і всі сценарії розглядаються як внутрішні. Як показано на рисунку 3.1, кожна комірка - це квадратна площа. Посилаючись на модель заводу в приміщенні, яка використовується в моделі каналу 3GPP InF-DH [24], розмір комірки зазвичай становить 50 м на 50 м. Точка доступу розгортається в центрі комірки. Кілька STA, що представляють об'єкти, які виконують різні додатки, мають фіксовані позиції і випадковим чином розподілені в комірці рівномірно.

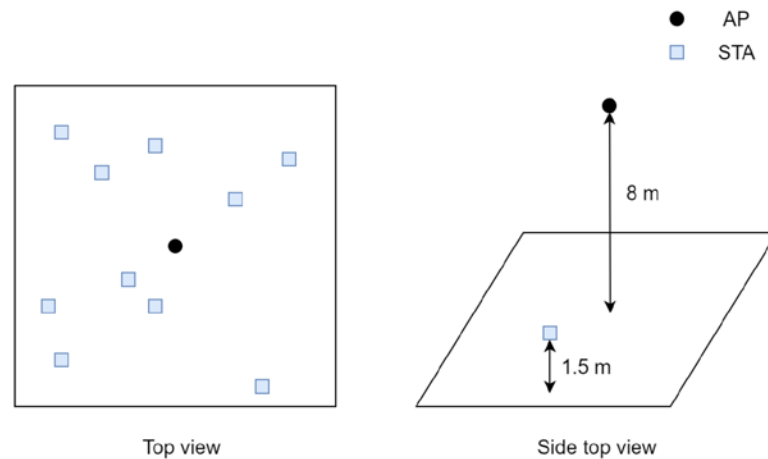


Рисунок 3.1 – Схема розгортання точок доступу та STA в кімнаті

Окрім розташування пристроїв, висота антен також має значення, оскільки пристрої в промислових сценаріях розгортаються не так, як вдома чи в офісах [25]. Як правило, кабелі дротової мережі монтуються на металевих фермах близько до стелі, висота якої становить приблизно 6 м. Як наслідок, точки доступу часто кріпляться до ферм, щоб легко підключатися до дротової магістральної мережі [23]. Крім того, компоненти бездротового зв'язку, встановлені на машинах, також знаходяться на певній висоті, щоб мати безперешкодне середовище поширення. Беручи за основу [23] та [24], ми припускаємо, що всі антени в моделюванні є ізотропними, а висота антен AP становить 8 м, тоді як висота антен STA - 1,5 м.

Потужність передачі пристроїв відповідає нормам FCC. У діапазоні 5 ГГц і AP, і STA мають максимальну ефективну ізотропну випромінювану потужність (EIRP) 30 дБм [26, 27]. У діапазоні 6 ГГц ми припускаємо, що всі пристрої належать до класу малопотужних пристроїв для використання всередині приміщень, тому точки доступу мають максимальну EIRP 24 дБм, а STA - 18 дБм.

3.3 Моделювання періодичного трафіку

За допомогою цього першого набору симуляцій ми хотіли б зрозуміти, як еволюція Wi-Fi 6E від Wi-Fi 5 робить його більш конкурентоспроможним у відносно ідеальному промисловому сценарії. Тому ми вибрали звичайне розгортання сценарію з однією точкою доступу площею 50 м на 50 м і встановили базову лінію як систему Wi-Fi 5, що працює в каналі 20 МГц. Ми вирішили почати з періодичного трафіку, оскільки згідно з дослідженням промислових бездротових додатків [17], більшість додатків мають періодичний трафік, що означає, що пакети фіксованого розміру DL або UL періодично генеруються на прикладному рівні.

Щоб зрозуміти переваги Wi-Fi 6E, продуктивність Wi-Fi 6E порівнюється з базовим Wi-Fi 5 при обробці різного періодичного трафіку.

Як показано в таблиці 3.2, протестовані моделі трафіку відрізняються за напрямком трафіку, швидкістю передачі пакетів і розміром пакетів. Вимоги до зв'язку - затримка 500 мс і 100% надійність. Продуктивність Wi-Fi виражається як кількість підтримуваних STA із заданими вимогами. Зверніть увагу, що всі точки доступу Wi-Fi 6E в цьому наборі симуляцій використовують ідеальний планувальник, оскільки ми хотіли б протестувати ідеальний сценарій в першому наборі симуляцій.

Таблиця 3.2 - Параметри та вимоги при моделюванні періодичного трафіку

Parameter	Value
Cell size	50 m * 50 m
Channel width	20 MHz
Wi-Fi version	Wi-Fi 6E; Wi-Fi 5
Traffic direction	UL; DL
Packet size	200 Byte; 2000 Byte
Packet rate	10packets/s; 100packets/s
Requirement	Value
Latency	500 ms
Reliability	100%

3.4 Моделювання дистанційно керованих роботів

Після того, як ми зрозуміли продуктивність Wi-Fi 6E з періодичним трафіком, ми випробуємо систему Wi-Fi за допомогою дистанційно керованого робота. Як показано на рисунку 3.2, в цьому додатку точка доступу як контролер робота надсилає 1200-байтне керуюче повідомлення всім роботам кожні 4 мс. Після отримання повідомлення роботи витрачають 1 мс на його обробку, а потім відповідають повідомленням розміром 2500 байт. Крім того, програма дистанційно керованих роботів працює синхронно, тобто контролер завжди намагається одночасно надіслати одне й те саме керуюче повідомлення всім роботам у комірці.

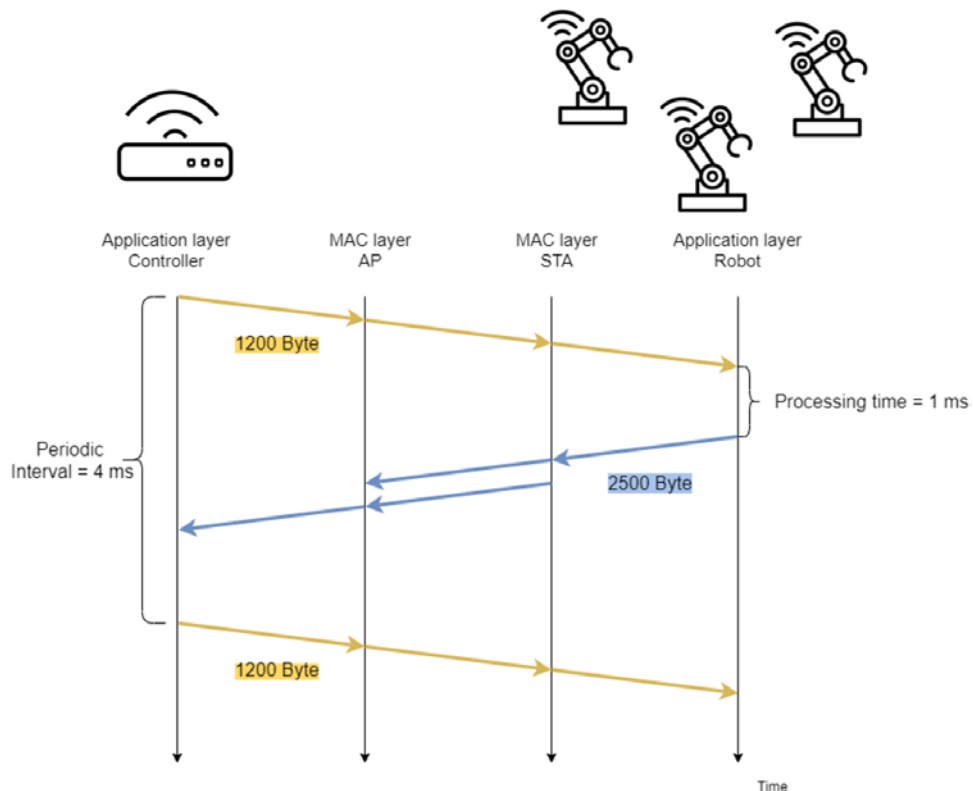


Рисунок 3.2 – Алгоритм роботи дистанційно керованої робототехнічної мережі

Що стосується вимог цієї програми, то звичайна затримка, що вимірюється від передачі до отримання пакету програми, не настільки важлива. Натомість важлива затримка циклу. Затримка циклу - це час, необхідний контролеру

робота для завершення циклу обміну пакетами з роботом. Він вимірюється після того, як контролер передав керуюче повідомлення, і до того, як контролер знову отримав повідомлення-відповідь від робота. Затримка циклу завжди повинна бути меншою за періодичність трафіку, щоб контролер робота міг отримати попереднє повідомлення-відповідь перед передачею наступного керуючого повідомлення.

Оскільки дистанційно керований робот має більш складну структуру трафіку і суворі вимоги до затримки в 4 мс на додаток до періодичності трафіку, ми вирішили також протестувати продуктивність Wi-Fi 6E з каналами 20 МГц і 80 МГц. Крім того, ми також зменшили періодичність трафіку до 8 мс і 20 мс, тому вимоги до затримки також становлять 8 мс і 20 мс відповідно.

Таблиця 3.3 - Параметри та вимоги до моделювання дистанційно керованого робота

Parameter	Value
Cell size	50 m * 50 m
Channel width	20 MHz; 80 MHz
Traffic periodicity	4 ms; 8 ms; 20 ms
Requirement	Value
Cycle latency	4 ms; 8 ms; 20 ms
Reliability	90%

3.5 Моделювання співіснування

Досі ми розглядали продуктивність Wi-Fi з простими і складними додатками, але завжди у відносно ідеальному середовищі, де лише одна точка доступу працює з одним додатком. Однак в реальних умовах одна система Wi-Fi може працювати з декількома додатками, і велика ймовірність того, що кілька систем Wi-Fi будуть працювати в комірках, що перекриваються, тому варто подивитися, як змінюється продуктивність при співіснуванні додатків і систем Wi-Fi в одній комірці.

У цьому наборі симуляцій використано два додатки. Дистанційно керований робот - це той самий додаток але з періодичністю та затримкою у 8 мс. Іншими словами, один цикл передавання керуючого повідомлення та повідомлення-відповіді повинен бути завершений протягом 8 мс. Для порівняння, інша програма для датчика має періодичну передачу даних UL з невеликим розміром пакету програми 64 байти і швидкістю 100 пакетів/с.

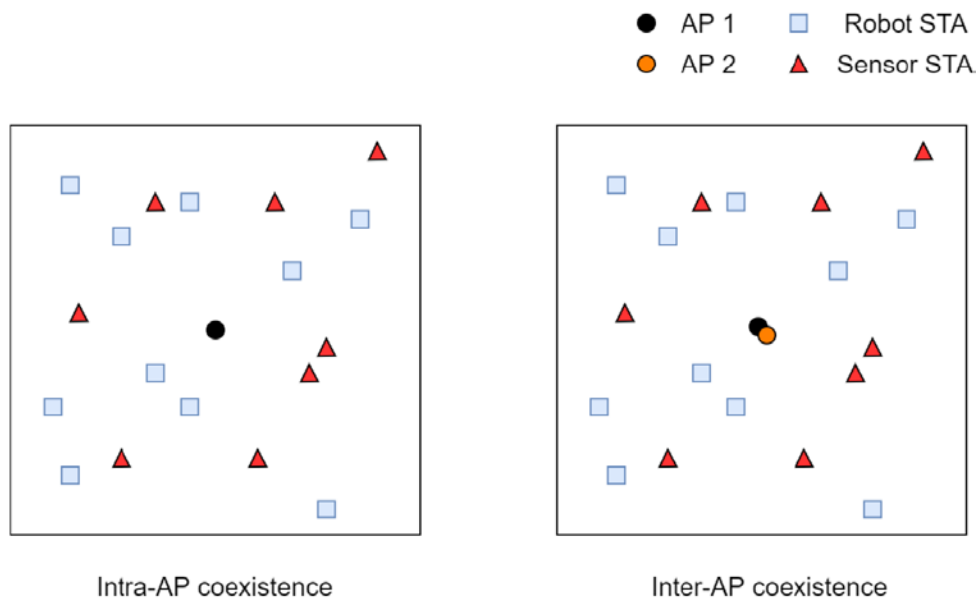


Рисунок 3.3 – Протестовані типи сценаріїв співіснування при моделюванні множинного доступу

Ми протестували два типи співіснування, як показано на рисунку 3.3. Перший - це співіснування всередині точки доступу, тобто співіснування двох додатків в одній системі Wi-Fi. Тому лише точка доступу 1 відповідає за весь трафік. Другий тип - це співіснування між точками доступу, при якому дві системи Wi-Fi існують у комірках, що перекриваються.

Одна система Wi-Fi працює з дистанційно керованими роботами, а інша, яка є системою Wi-Fi 5, працює з датчиками.

Таблиця 3.4 - Параметри та вимоги в моделюванні співіснування

Parameter	Value
Cell size	50 m* 50 m
Coexistence	Intra-AP coexistence; Inter-AP coexistence
Traffic periodicity	8 ms
Requirement	Value
Cycle latency	8 ms
Reliability	90%

3.6 Моделювання багатостільникової мережі

На завершальному етапі розглянемо більш реалістичний сценарій використання, де ми хотіли б перевірити роботу Wi-Fi 6E на фабриці з великою площею, де Wi-Fi 6E повинен працювати в декількох стільниках через велику площу фабрики. Планування заводу має довжину 300 м і ширину 150 м, що відповідає моделі заводу в приміщенні, наведеній в [24]. Щоб підтримувати продуктивність Wi-Fi в кожній комірці, ми розділили велику фабрику на маленькі комірки і спробували досягти належного частотного планування. Оскільки попередній розмір осередку становив 50 м 50 м у діапазоні 5 ГГц, фабрика складалася з 18 осередків. Моделювання проводиться окремо для застарілого діапазону 5 ГГц і нового діапазону 6 ГГц Wi-Fi 6E.

Що стосується частотного планування в діапазоні 6 ГГц, оскільки ми припускаємо, що всі пристрої в діапазоні 6 ГГц - це пристрої з низьким енергоспоживанням для використання всередині приміщень з меншим лімітом потужності, як показано в таблиці 1.4, пристрої не можуть підтримувати однакову продуктивність через падіння якості зв'язку, спричинене обмеженою потужністю передавача. Оскільки потужність передачі на 12 дБ менша, ми зменшуємо розмір комірок в 16 разів до 12,5 м 12,5 м після припущення, що потужність зменшується пропорційно квадрату відстані.

Після того, як ми визначилися з розподілом сот, ми можемо виконати частотне планування, призначивши кожній соті канал 80 МГц. Канали зазвичай розташовуються в компактних і стекових схемах повторного використання [28],

щоб мінімізувати міжстільникові перешкоди при повторному використанні каналів. Ми розробили програму на мові Python для пошуку найкращої схеми для 5 ГГц і 6 ГГц з метриками середньостатистичної та максимальної інтерференції в комірці. Як показано в рівнянні 3.1, $I_{Cell_i}^{Cell_j}$ представляє заваду $Cell_i$, отриману від стільника $Cell_j$, якому виділено той самий канал. P_j і G_j представляють потужність передачі і коефіцієнт підсилення антени відповідно, d_{ij} - відстань між 2-ма точками доступу $Cell_i$ і $Cell_j$, а експонента втрат на шляху дорівнює 2 відповідно до моделі каналу InF-DH. Шляхом підсумовування завад від усіх інших стільників, що використовують той самий канал на заводі, I_{Cell_i} розраховується як повна завада, яку отримує $Cell_i$ на заводі. На основі рівняння 3.1 можна розрахувати середні та максимальні завади для стільника, як показано в рівняннях 3.2 і 3.3 відповідно. Шукаючи мінімум цих двох показників, наша програма на Python може визначити, яке частотне планування є кращим і яка комірка приймає найсильніші перешкоди.

$$I_{Cell_i} = \frac{\sum_{j, j \neq i} I_{Cell_i}^{Cell_j}}{n} = \frac{\sum_{j, j \neq i} \frac{P_j \cdot G_j}{d_{ij}^\alpha}}{n} \quad (\alpha = 2) \quad (4.1)$$

$$I_{Cell-average} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{Cell_i}}{n} \quad (4.2)$$

$$I_{Cell-maximum} = \max_{Cell_{1,2,\dots,i}} I_{Cell_i} \quad (4.3)$$

Нарешті, оскільки точки доступу в усіх комірках керують дистанційно керованими роботами, оцінка Wi-Fi 6E проводиться в найгіршій комірці, яка зазнає найсильніших перешкод. Продуктивність знову ж таки представлена в термінах кількості дистанційно керованих роботів, яких Wi-Fi 6E може підтримувати з періодичністю трафіку роботів 8 мс. Зверніть увагу, що в

кожній комірці кількість STA і тип планувальника кожної точки доступу однакові.

Таблиця 3.5 - Параметри та вимоги в симуляціях з декількома комірками

Parameter	Value
Channel width	80 MHz
Wi-Fi band	5 GHz; 6 GHz
Cell size	50 m * 50 m (5 GHz); 12.5 m * 12.5 m (6 GHz)
Cell quantity	18 (5 GHz); 288 (6 GHz)
Requirement	Value
Latency	8 ms
Reliability	90%

3.7 Висновки до розділу 3

Для розробки та реалізації чотирьох наборів симуляцій, які включають симуляцію періодичного руху, симуляцію дистанційно керованих роботів, симуляцію співіснування та симуляцію багатокоміркової мережі, можна використовувати спеціалізовані інструменти та підходи для симуляції бездротових мереж і робототехніки.

Використані популярні симуляційні середовища для бездротових мереж, які підтримують сценарії з періодичним рухом, дистанційно керованими роботами, співіснуванням та багатокомірковими мережами.

Запропонована модель дозволила симулювати періодичний рух пристроїв і роботів у мережі. В результаті визначено характеристики руху, такі як швидкість, траєкторія, періодичність.

Здійснено імітацію взаємодії з дистанційно керованими роботами у симуляції. Разом з тим, розглянуто питання комунікації між роботами та мережевими вузлами.

Запропоновано сценарії для симуляції співіснування різних пристроїв у мережі з різними технологіями із врахуванням їх впливу на продуктивність мережі. Розглянуто сценарії для багатокоміркових мереж, де пристрої можуть

взаємодіяти з кількома точками доступу або іншими вузлами одночасно. Разом з тим, досліджено параметри, такі як канал, пропускна здатність.

4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОВЕДЕНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У розділі представлено результати чотирьох наборів симуляцій, які показують продуктивність Wi-Fi 6E у різних промислових сценаріях. Кожен результат ми аналізуємо під кутом зору функцій Wi-Fi і робимо висновки про характеристики Wi-Fi 6E, включаючи як переваги, так і недоліки.

4.1 Моделювання періодичного трафіку

У першій серії симуляцій ми хотіли б оцінити переваги Wi-Fi 6E порівняно з Wi-Fi 5 при роботі з різними промисловими додатками з періодичним трафіком. Тому ми тестуємо як Wi-Fi 6E, так і Wi-Fi 5, використовуючи ідеальний періодичний трафік, а потім змінюємо параметри трафіку, щоб імітувати різні додатки.

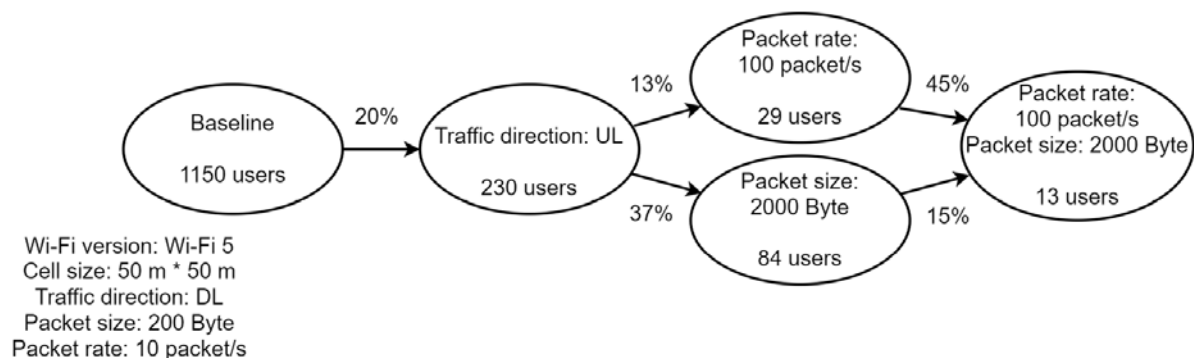


Рисунок 4.1 - Продуктивність базового Wi-Fi 5 з різним періодичним трафіком

Рисунок 4.1 відображає продуктивність базового Wi-Fi 5. Базовий Wi-Fi 5 може підтримувати максимум 1150 користувачів при заданих вимогах. Для порівняння, Wi-Fi 5 показує досить низьку продуктивність, коли трафік стає UL, підтримуючи лише 230 користувачів. Зверніть увагу, що кількість підтримуваних STA величезна, оскільки вимоги до затримки і навантаження на трафік дуже низькі при ідеальному періодичному трафіку. Для реальних

пристроїв такі вимоги та навантаження не є репрезентативними. Більше того, якщо ми збільшуємо швидкість передачі або розмір пакетів в UL, продуктивність Wi-Fi 5 дуже чутлива до збільшення швидкості передачі пакетів. Хоча в обох випадках загальна пропускна здатність збільшується в 10 разів, Wi-Fi 5 зберігає лише 13% продуктивності UL при 10-кратному збільшенні швидкості передачі, але зберігає 37% продуктивності при збільшенні розміру пакета в 10 разів.

Як розрив у продуктивності Wi-Fi 5 з різноспрямованим трафіком, так і чутливість Wi-Fi 5 до швидкості передачі пакетів пов'язані з доступом до каналу. При DL-трафіку доступ до каналу має лише точка доступу, тому Wi-Fi 5 добре працює в DL без жодних проблем. Однак, як тільки трафік стає UL, кілька STA можуть отримати доступ до каналу одночасно, що призводить до колізій, і, таким чином, Wi-Fi 5 має гіршу продуктивність в UL. Аналогічно, STA отримують доступ до каналу частіше, якщо швидкість передачі пакетів для кожного користувача збільшується. Як наслідок, Wi-Fi 5 може підтримувати набагато менше STA з вищою швидкістю передачі пакетів, хоча розмір пакетів залишається незмінним.

Wi-Fi 6E з його новим методом доступу до каналу, OFDMA, демонструє кращу продуктивність, ніж базова версія. На рисунку 4.2 наочно показано, наскільки Wi-Fi 6E перевершує Wi-Fi 5 при однаковому трафіку в режимах DL або UL. Вертикальні стрілки з'єднують продуктивність двох протестованих систем Wi-Fi при роботі з однаковим трафіком, тоді як горизонтальні стрілки показують, як змінюється продуктивність Wi-Fi при різному трафіку. Загалом, Wi-Fi 6E може підтримувати велику кількість користувачів у будь-якому випадку і стабільно перевершує Wi-Fi 5. Як ми бачимо на рисунку 4.2 а, Wi-Fi 6E може підтримувати майже на 50% більше користувачів, ніж Wi-Fi 5 в DL, незалежно від того, чи збільшується швидкість передачі пакетів, за винятком останнього випадку, коли ми збільшуємо як швидкість передачі, так і розмір пакетів у 10 разів, обидві системи Wi-Fi мають схожу продуктивність. Реальна перевага Wi-Fi 6E має місце в продуктивності UL. Як показано на рисунку 4.2

b, Wi-Fi 6E має величезний вигравш у продуктивності, до 990% після збільшення швидкості передачі пакетів.

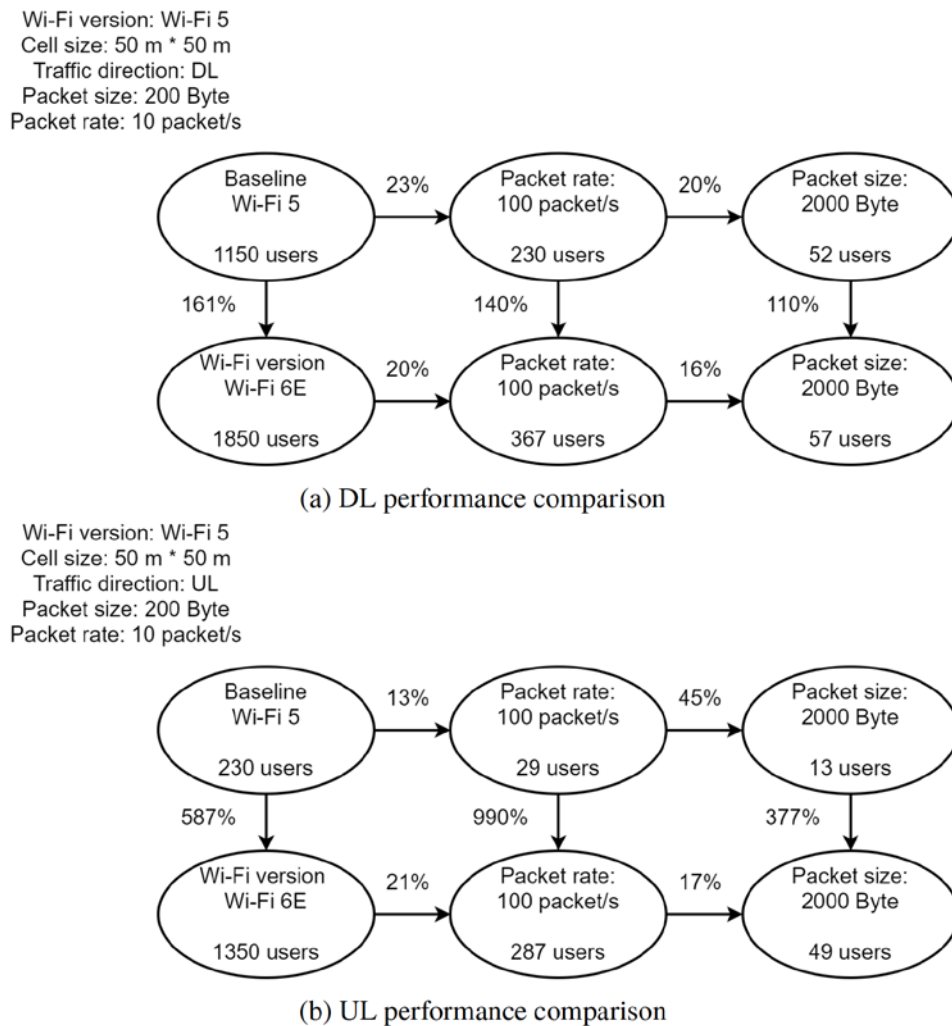


Рисунок 4.2 - Порівняння продуктивності Wi-Fi 5 та Wi-Fi 6E

Покращення продуктивності Wi-Fi 6E можна пояснити раніше представленою передачею OFDMA MU. Замість того, щоб Wi-Fi 5 виділяв всю смугу пропускання для кожного STA і робив зворотний хід, якщо виникає конфлікт, Wi-Fi 6E може планувати роботу декількох користувачів одночасно і, таким чином, економити значну частину накладних витрат, пов'язаних із зіткненнями. В результаті, Wi-Fi 6E не тільки може підтримувати більше STA в DL і UL, але також може обробляти більш частий доступ до каналу завдяки збільшенню швидкості передачі пакетів.

Отже, дві нові характеристики Wi-Fi 6E полягають в наступному: (1) Wi-Fi 6E може використовуватись у багатьох поширених промислових додатках як в UL, так і в DL. (2) Завдяки OFDMA, Wi-Fi 6E перевершує Wi-Fi 5 і стає більш придатним для роботи з великою кількістю STA або трафіком з високою швидкістю передачі пакетів в UL.

4.2 Моделювання дистанційно керованого робота

Випробуємо системи Wi-Fi за допомогою дистанційно керованого робота. Задіяна програма має складну схему руху і суворі вимоги до затримки циклу.

На рисунку 4.3 показано ймовірність виходу з ладу різних систем Wi-Fi під час роботи з дистанційно керованими роботами. І Wi-Fi 5, і Wi-Fi 6E в кращому випадку можуть підтримувати лише 4 і 6 роботів відповідно із заданою 90% надійністю.

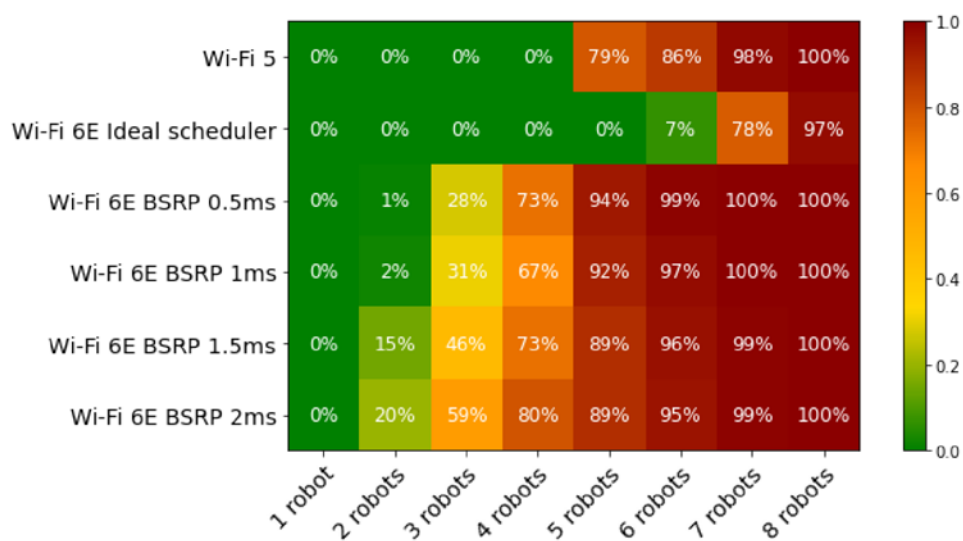


Рисунок 4.3 - Імовірність виходу з ладу дистанційно керованого робота

У Wi-Fi 6E, чим довший інтервал BSRP, тим гірша продуктивність, оскільки довші інтервали BSRP можуть призвести до збільшення часу очікування UL-трафіку. Крім того, хоча Wi-Fi 6E демонструє переваги,

особливо з UL-трафіком в розділі 4.1, досить дивно, що Wi-Fi 5 перевершує Wi-Fi 6E з планувальником BSRP, коли справа доходить до керування цим додатком з високими вимогами.

Використання аналізу кадрів і PPDU показує, що занадто мала кількість запланованих користувачів пояснює, чому Wi-Fi 6E з планувальником BSRP має гіршу продуктивність.

Отже, Wi-Fi 6E не може показати свою перевагу в роботі з великою кількістю STA, якщо точка доступу може підтримувати лише кілька STA з певними додатками. Аналіз кадрів і PPDU показує випадок, коли система Wi-Fi працює з 3 роботами. Використовуючи рисунок 4.4 як приклад, графіки аналізу ілюструють обмін кадрами і пакетами фізичного рівня за один цикл трафіку, а саме: одне керуюче повідомлення DL і одне повідомлення-відповідь UL.

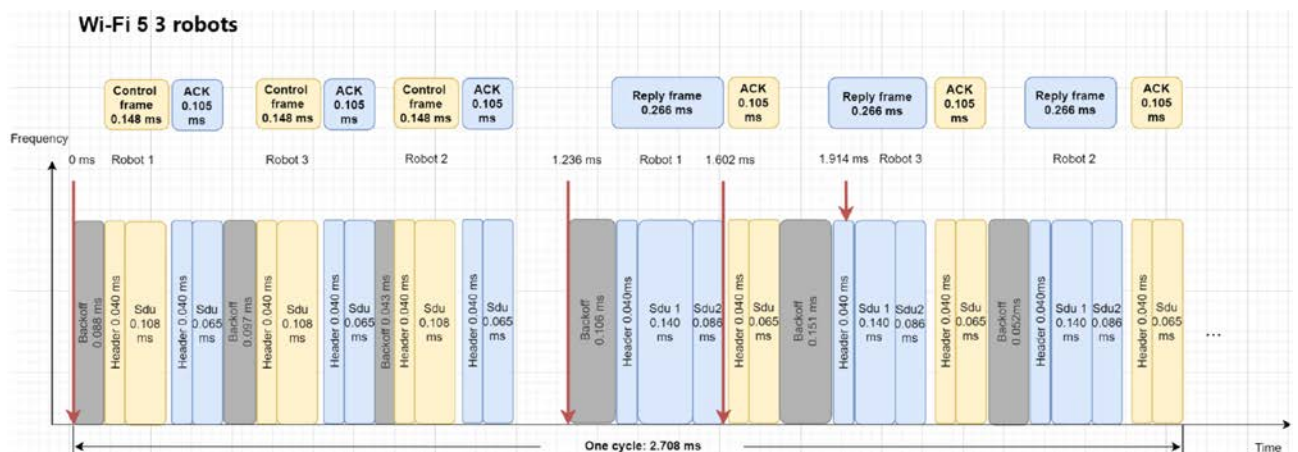


Рисунок 4.4 – Алгоритм функціоналу 3 роботів у мережі Wi-Fi 5

Пакети UL позначені синім кольором, а пакети DL - жовтим. Червоні стрілки вказують, коли повідомлення прикладного рівня готове. Зауважте, що пакети фізичного рівня з преамбулами та заголовками об'єднано у пакети заголовків на рисунках для кращої візуалізації.

На рисунку 4.4 показано, як точка доступу Wi-Fi 5 керує 3 роботами. Тут кожен кадр послідовно передається 3 рази, а саме: 3 кадри керуючих повідомлень DL від контролера і 3 кадри повідомлень-відповідей UL від

роботів. Використання каналу здається досить високим. Крім того, ми можемо помітити, що накладні витрати на заголовки і підтвердження (АСК) лінійно зростають зі збільшенням кількості переданих повідомлень.

На противагу цьому, Wi-Fi 6E розроблений з OFDMA передачею MU і BA.

Як показано на рисунку 4.5, для передачі MU канал розбивається на 3 RU, тому потрібно лише 1/3 заголовків і АСК порівняно з Wi-Fi 5.

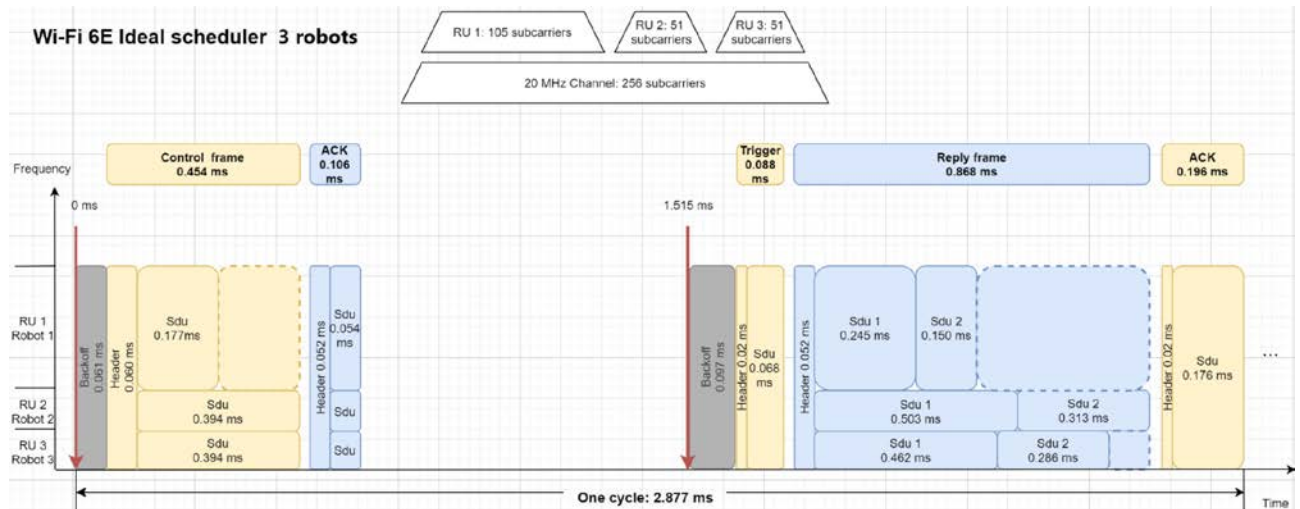


Рисунок 4.5 – Алгоритм роботи 3 роботів у мережі Wi-Fi 6E з ідеальним планувальником

При передачі як DL, так і UL, кадри даних з меншою тривалістю повинні бути додані для досягнення однакової тривалості передачі через покадрову передачу MU в 802.11ax OFDMA.

Хоча Wi-Fi 6E може заощадити накладні витрати на заголовки і АСК, Wi-Fi 6E вимагає більше кадрів для завершення одного циклу обміну повідомленнями. За допомогою планувальника BSRP трафік UL не може бути запущений, якщо не отримано BSRP.

Тому, як показано на рисунку 4.6, у найгіршому випадку 3 роботи просто пропускають один BSRP і змушені чекати ще 1 мс, перш ніж зможуть повідомити про свій стан.

Крім часу очікування періодичного BSRP, додаткові кадри, включаючи BSRP, BSR і тригерні кадри, також займають час в кожній передачі UL. Через ці накладні витрати Wi-Fi 6E потребує більше часу для завершення одного циклу передачі, а отже, має гіршу продуктивність, ніж Wi-Fi 5.

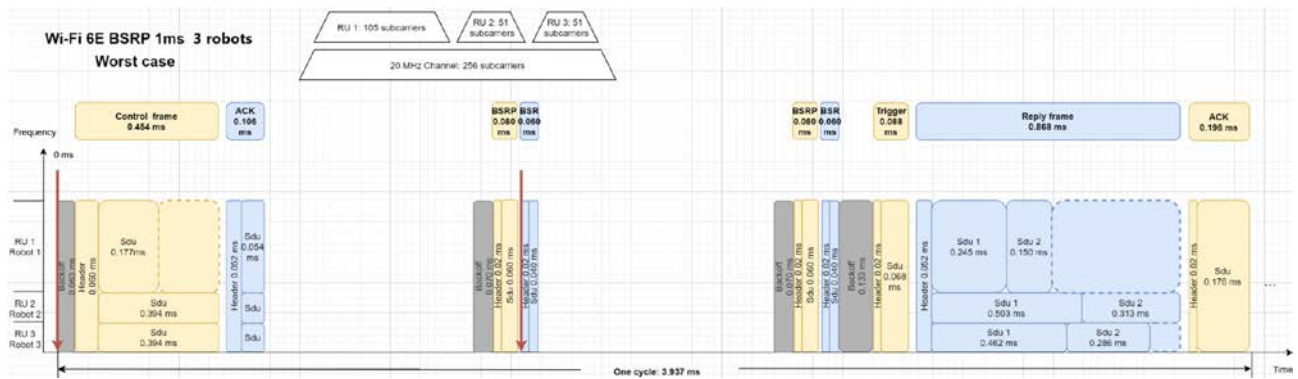


Рисунок 4.6 – Алгоритм функціоналу 3 роботів у мережі Wi-Fi 6E з планувальником BSRP

Отже, OFDMA допомагає Wi-Fi 6E економити накладні витрати на заголовки і ACK, чим більше STA заплановано, тим більше накладних витрат економиться. З іншого боку, в OFDMA потрібно більше часу на додаткові кадри і час очікування BSRP. Тому, коли додаток має жорсткі вимоги і можна запланувати лише кілька STA, Wi-Fi 6E з планувальником BSRP не може показати свою перевагу в управлінні великою кількістю STA, а фактично працює гірше, ніж застарілий Wi-Fi 5.

З огляду на вищезазначений висновок, ми очікуємо покращення продуктивності Wi-Fi 6E при плануванні більшої кількості STA. Верифікаційна симуляція виконана шляхом зміни періодичності трафіку дистанційно керованого робота на 8 мс і 20 мс, а потім збільшенням ширини каналу до 80 МГц. Результати моделювання показано на рисунках 4.7 та 4.8 відповідно. Зверніть увагу, що допуск на затримку циклу завжди дорівнює періодичності руху.

Wi-Fi version: Wi-Fi 5
 Channel width: 20 MHz
 Cell size: 50 m * 50 m
 Traffic periodicity: 4 ms

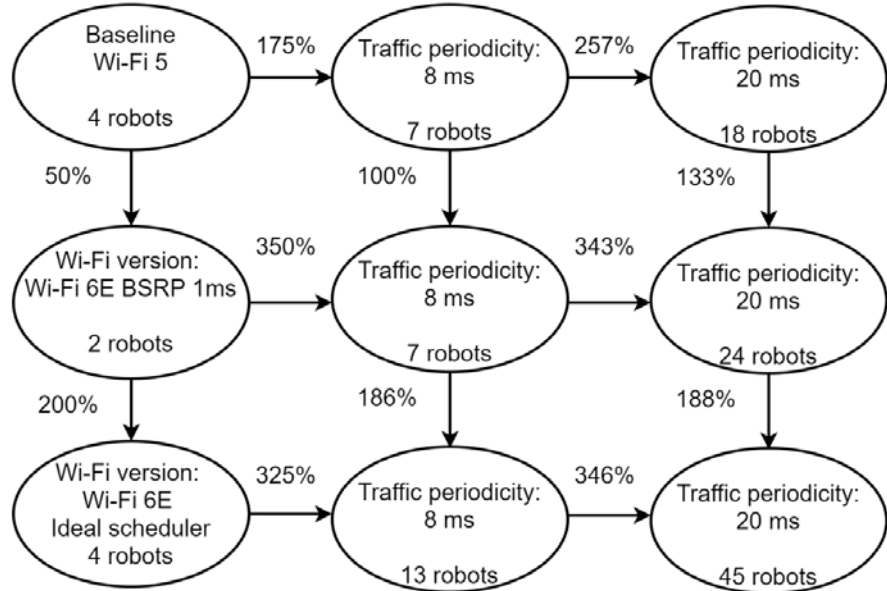


Рисунок 4.7 - Продуктивність Wi-Fi з різною періодичністю руху робота

Wi-Fi version: Wi-Fi 6E
 Channel width: 20 MHz
 Cell size: 50 m * 50 m
 Traffic periodicity: 4 ms

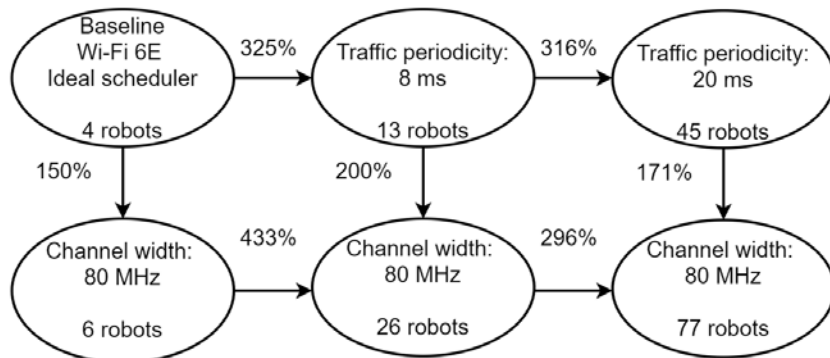


Рисунок 4.8 - Продуктивність Wi-Fi у різних каналах

Як показано на рисунку 4.7, Wi-Fi 6E досягає значного покращення зі збільшенням періодичності трафіку. Більше того, зі збільшенням періодичності

трафіку Wi-Fi 6E з планувальником BSRP наздоганяє Wi-Fi 5 за продуктивністю, коли періодичність трафіку становить 8 мс, і навіть випереджає його при 20 мс. Крім того, з ідеальним планувальником Wi-Fi 6E виграє як у випадку 8 мс, так і у випадку 20 мс. Ці результати не тільки підтверджують наш вищенаведений висновок про те, що високі вимоги обмежують продуктивність Wi-Fi 6E, але також підтверджують, що тільки шляхом планування більшої кількості STA Wi-Fi 6E може компенсувати час, витрачений на додаткові кадри.

Крім того, Wi-Fi 6E також отримує покращення продуктивності, якщо ширина каналу збільшується з 20 МГц до 80 МГц. Однак продуктивність не покращується пропорційно збільшенню ширини каналу. Як показано на рисунку 4.8, кількість підтримуваних роботів не збільшується в 4 рази зі збільшенням ширини каналу. Натомість Wi-Fi 6E в каналі 80 МГц може підтримувати від 150% до 200% від кількості роботів в каналі 20 МГц. Перевіривши передачу пакетів на фізичному рівні, ми виявили, що більша смуга пропускання вигідна лише пакетам Service Data Unit (SDU) для передачі даних. Заголовки, АСК, тригерні кадри та час очікування BSRP все ще мають фіксований час. Тому продуктивність не може зростати пропорційно ширині каналу.

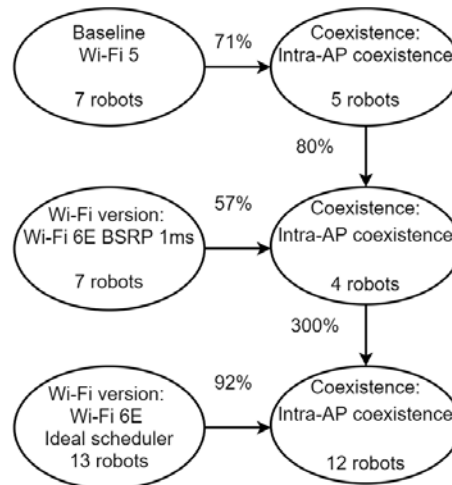
На закінчення, ми виявили, що Wi-Fi 6E працює гірше, ніж Wi-Fi 5, в специфічних промислових додатках, які мають складний трафік і суворі вимоги до затримки аж до мілісекундного рівня. Тільки за рахунок планування більшої кількості STA Wi-Fi 6E може заощадити накладні витрати на заголовки, АСК і зворотні повідомлення в якості компенсації за додаткові кадри, необхідні для OFDMA. Розширення ширини каналу покращує переваги передачі MU у Wi-Fi 6E, але продуктивність не збільшується пропорційно ширині каналу.

4.3 Моделювання співіснування

У цьому підрозділі розглядається співіснування всередині точки доступу і співіснування між точками доступу, представлене в розділі 3.5, щоб показати продуктивність Wi-Fi в більш практичних сценаріях.

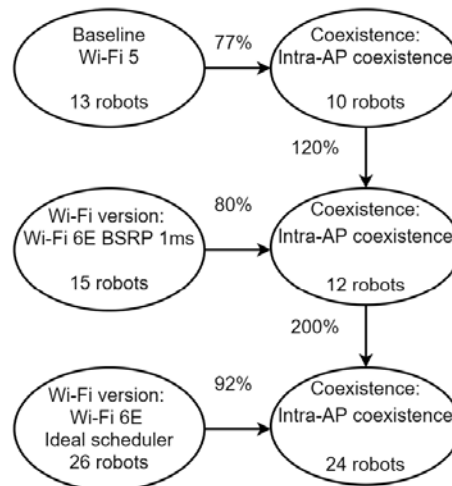
На рисунку 4.9 у кожному стовпчику показано по одному сценарію без співіснування або зі співіснуванням всередині точки доступу, а в кожному рядку - різні системи Wi-Fi як точки доступу 1. Якщо бути точним, то системи Wi-Fi у першому стовпчику керують лише дистанційно керованими роботами. У другому стовпчику точка доступу 1 обслуговує не лише роботів, але й 10 датчиків.

Wi-Fi version: Wi-Fi 5
 Channel width: 20 MHz
 Cell size: 50 m * 50 m
 Robot traffic periodicity: 8 ms
 Coexistence: No coexistence



(a) Wi-Fi performance in a 20 MHz channel

Wi-Fi version: Wi-Fi 5
 Channel width: 80 MHz
 Cell size: 50 m * 50 m
 Robot traffic periodicity: 8 ms
 Coexistence: No coexistence



(b) Wi-Fi performance in a 80 MHz channel

Рисунок 4.9 – Продуктивність Wi-Fi при співіснуванні всередині точки доступу

Як видно на рисунку 4.9 а, Wi-Fi 6E з планувальником BSRP має більшу деградацію продуктивності, ніж Wi-Fi 5 в каналі 20 МГц. Однак на рисунку 4.9 б Wi-Fi 6E з планувальником BSRP працює трохи краще, ніж Wi-Fi 5 в каналі 80 МГц. Для порівняння, Wi-Fi 6E з ідеальним планувальником завжди працює найкраще.

Причиною гіршої продуктивності Wi-Fi 6E в деяких випадках більше не є те, що Wi-Fi 6E обслуговує занадто мало користувачів для планування, оскільки періодичність трафіку була збільшена до 8 мс. Перевіривши обмін кадрами, ми виявили, що при обробці таких двох додатків з дуже різними розмірами пакетів в UL, 2500 байт і 64 байти відповідно, передача MU може бути обтяжливою через проблеми з заповненням. Рисунок 4.10 показує один із сценаріїв, в якому Wi-Fi 6E має гіршу продуктивність при плануванні чотирьох датчиків і одного робота. Як ми бачимо, Wi-Fi 6E повинен заповнювати RU датчиків, чекаючи на передачу великого повідомлення-відповіді від робота. Час передачі MU настільки довгий, що навіть передача всіх кадрів по одному в Wi-Fi 5 відбувається швидше. Більш того, Wi-Fi 6E з ідеальним планувальником може вирішити проблему заповнення, оскільки роботам і датчикам доводиться передавати менше MU, якщо їм не потрібно чекати на періодичні BSRP-повідомлення.

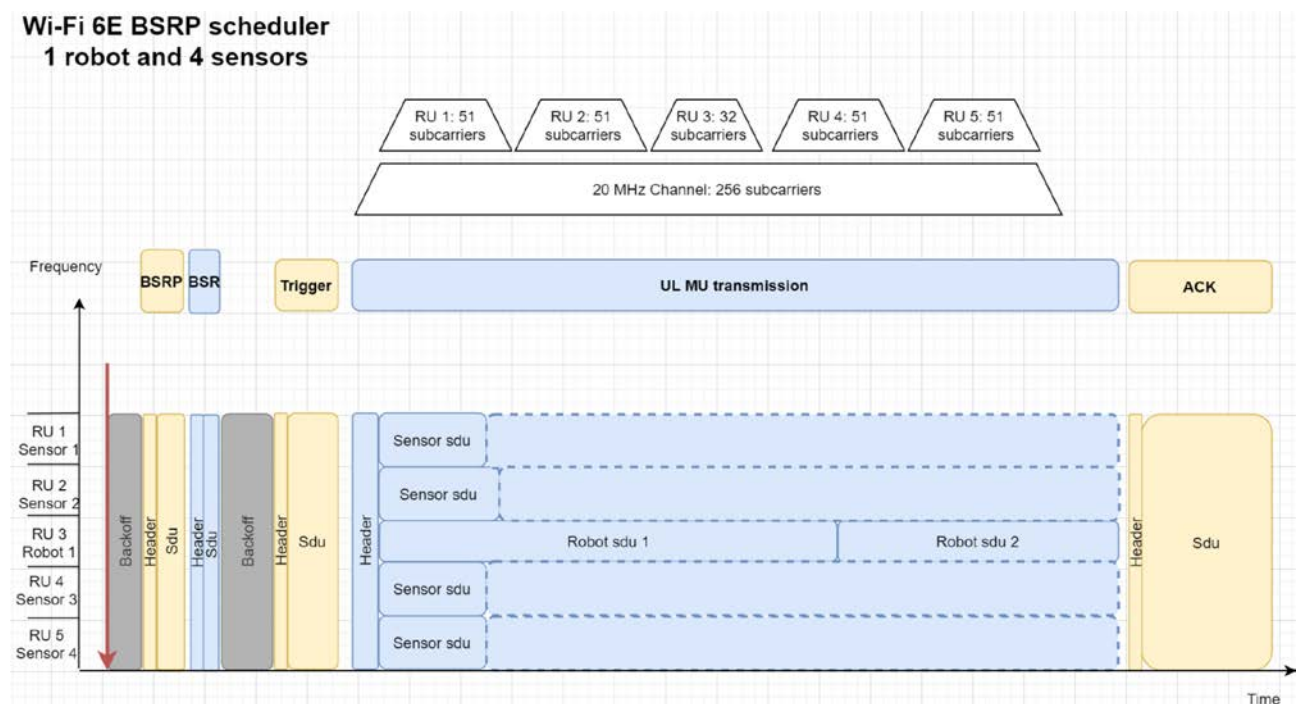


Рисунок 4.10 – Приклад сценарію з проблемами заповнення

Однак, перевіряючи окремі симуляції, Wi-Fi 5 не завжди може мати кращу продуктивність. Як було проаналізовано раніше, зі збільшенням кількості STA

накопичуються зворотні сигнали, коли відбувається занадто багато зіткнень. Тому, чи працює Wi-Fi 6E краще або гірше, залежить від того, скільки MU-передач двох додатків застосовуються, тому продуктивність варіюється в різних випадках.

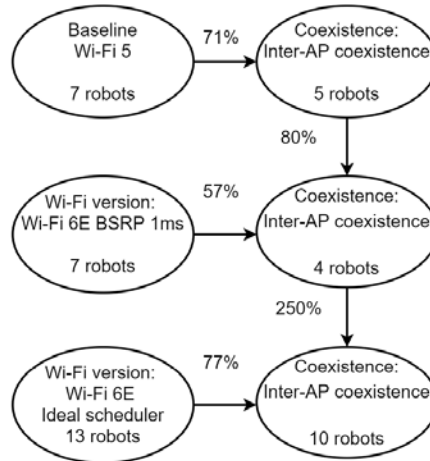
З огляду на те, що в практичних промислових сценаріях може працювати кілька додатків, Wi-Fi 6E не завжди виграє від OFDMA MU-передач через заповнення, коли є значні відмінності в розмірах пакетів додатків. Планувальник у симуляторі має на меті запланувати якомога більше користувачів, тому розумніший планувальник може призвести до кращої продуктивності, якщо він зможе врахувати ці проблеми з заповненням.

На рисунку 4.11 системи Wi-Fi у першій колонці керують лише дистанційно керованими роботами. У третьому стовпчику точка доступу 1 обслуговує дистанційно керованих роботів, тоді як точка доступу 2, яка є точкою доступу Wi-Fi 5, обслуговує 10 датчиків. При такому співіснуванні між точками доступу виникають суперечки між двома системами Wi-Fi, тому трафік або в точці доступу 1, або в точці доступу 2 повинен виконувати зворотні дії, коли виникає суперечка між роботами і датчиками. Розглядаючи фізичний рівень, 10 датчиків, що працюють в точці доступу Wi-Fi 5 AP 2, можуть зробити канал зайнятим на 16% часу моделювання.

Як показано в третьому стовпчику на рисунках 5.11a і 5.11b, Wi-Fi 6E з планувальником BSRP може підтримувати лише 80% і 70% роботів, які може підтримувати Wi-Fi 5 в каналі 20 МГц і в каналі 80 МГц відповідно.

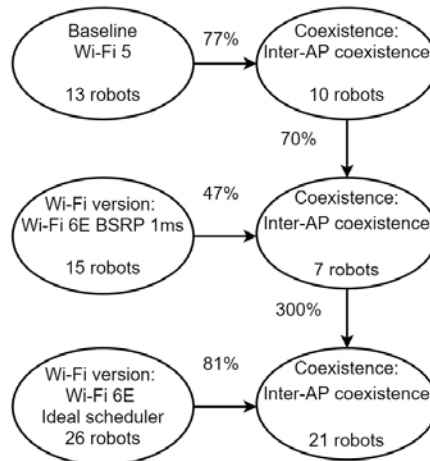
Причиною гіршої продуктивності знову ж таки є додаткові кадри в OFDMA. Після того, як Wi-Fi 5 займав 16% каналу, Wi-Fi 6E складніше обробляти необхідні додаткові кадри в OFDMA, які збільшують час одного циклу обміну повідомленнями, а отже, легше перевищити допустиму затримку циклу.

Wi-Fi version: Wi-Fi 5
 Channel width: 20 MHz
 Cell size: 50 m * 50 m
 Robot traffic periodicity: 8 ms
 Coexistence: No coexistence



(a) Wi-Fi performance in a 20 MHz channel

Wi-Fi version: Wi-Fi 5
 Channel width: 80 MHz
 Cell size: 50 m * 50 m
 Robot traffic periodicity: 8 ms
 Coexistence: No coexistence



(b) Wi-Fi performance in a 80 MHz channel

Рисунок 4.11 – Продуктивність Wi-Fi при співіснуванні між точками доступу

Тому ще однією характеристикою Wi-Fi 6E є те, що додаткові кадри Wi-Fi 6E під час OFDMA можуть зробити його нестійким у деяких випадках співіснування між точками доступу, в яких Wi-Fi 6E може працювати лише з обмеженими ресурсами каналу.

4.4 Моделювання з декількома стільниками

У підрозділі показано частотне планування і продуктивність Wi-Fi для діапазонів 5 ГГц і 6 ГГц окремо. Крім того, також проведено аналіз продуктивності Wi-Fi з повторним використанням каналу. - Моделювання декількох стільників у діапазоні 5 ГГц Як показано в таблиці 3.5, для 18 стільників на заводі можна запланувати шість каналів 80 МГц у діапазоні 5 ГГц. На рисунку 4.12 показано наш найкращий частотний план, який призводить до мінімальних середньостільникових і максимальних інтерференційних перешкод, представлених у розділі 3.6. Зовнішня синя межа показує вид зверху на фабрику, прямокутну ділянку розміром 300 м на 150 м. Кожен колір на рисунку позначає окремий канал 80 МГц. Осередки одного кольору використовують один і той же канал і конкурують один з одним. З таким розподілом каналів наша програма Python пройшла всі комірки і розрахувала інтерференцію для кожної комірки відповідно до рівняння 3.1. Фіолетова комірка, оточена синьою рамкою на рисунку 4.13, - це комірка, яка зазнає найбільших міжстільникових перешкод і, відповідно, має найгіршу продуктивність Wi-Fi.

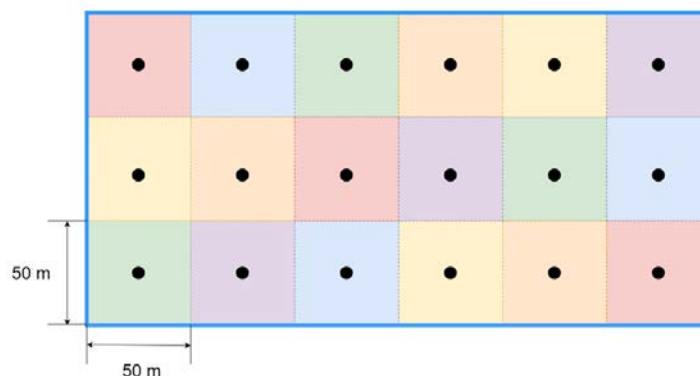


Рисунок 4.12 – Частотне планування в діапазоні 5 ГГц

Що стосується продуктивності в найгіршій комірці, то досить дивно, що Wi-Fi6E не може підтримувати навіть одного робота з 90% надійністю при використанні планувальника BSRP з інтервалом в 1 мс.

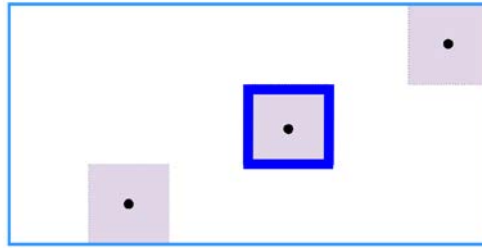


Рисунок 4.13 – Найгірша комірka в частотному плануванні діапазону 5 ГГц

Відповідно до журналів кадрів MAC рівня, виявляється, що така низька продуктивність в основному пов'язана з тим, що трафік від різних стільників конкурує за канал, не враховуючи один одного, як показано на рисунку 4.14. Після того, як керуюче повідомлення від контролера 1 в комірці 1 успішно отримано роботом 1, контролери або роботи з інших комірок можуть виграти боротьбу за канал до того, як робот 1 зможе відповісти контролеру 1 в комірці 1. Як показано на рисунку, два керуючих кадри UL і один кадр відповіді DL з інших комірок були успішно передані і прийняті, що робить затримку циклу трафіку в комірці 1 набагато більшою, ніж допустима затримка.

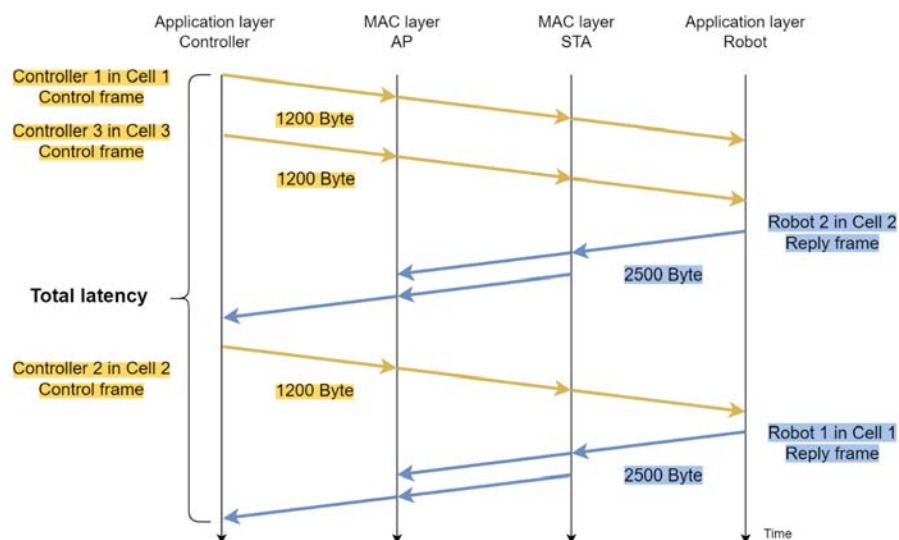


Рисунок 4.14 – Алгоритм обміну кадрами у багатостільниковому сценарії роботи мережі

Зауважте, що це падіння продуктивності пов'язане з особливостями трафіку робота, оскільки вимога до затримки стосується послідовності обміну повідомленнями, а не затримки, обмеженої для одного повідомлення. Звичайні додатки з періодичним трафіком не повинні мати подібного падіння продуктивності, оскільки затримка рахується через одну наскрізну передачу повідомлення. Тому не має значення, який робот виграє канал після успішного отримання одного повідомлення.

Багатостільникові симуляції в діапазоні 6 ГГц. При плануванні частот діапазону 6 ГГц, новий діапазон 6 ГГц містить 14 каналів по 80 МГц. Однак, в той же час, нам потрібно запланувати 288 стільників через обмежену потужність передачі в 6 ГГц. Ми запропонували три патерни повторного використання, показані на рисунку 4.15, і заповнили ними фабрику.

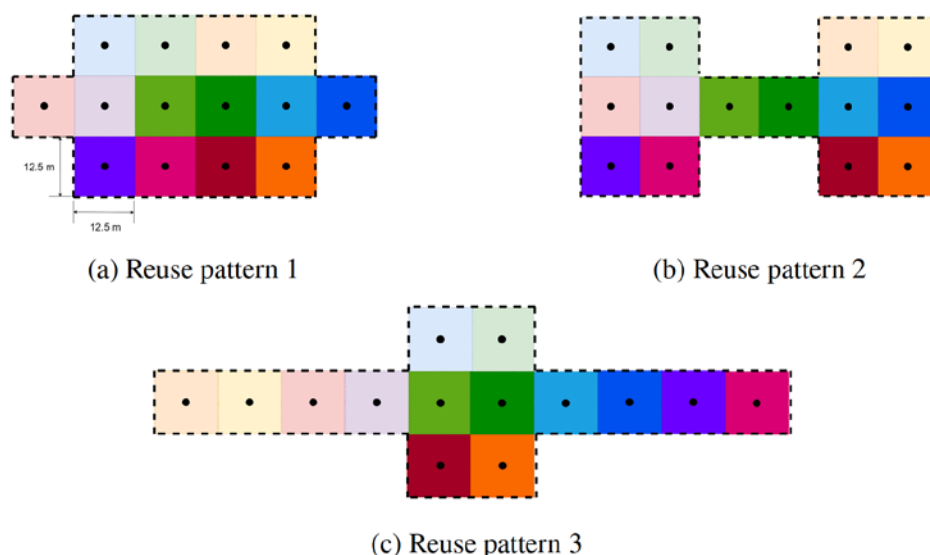


Рисунок 4.15 – Шаблони повторного використання в частотному плануванні смуги 6 ГГц

Після того, як програма Python розраховувала перешкоди для кожного стільника, виявилось, що перший шаблон може призвести як до мінімальних середніх перешкод для стільника, так і до максимальних перешкод.

На рисунку 4.16 показано результат розподілу каналів за допомогою першого шаблону повторного використання.

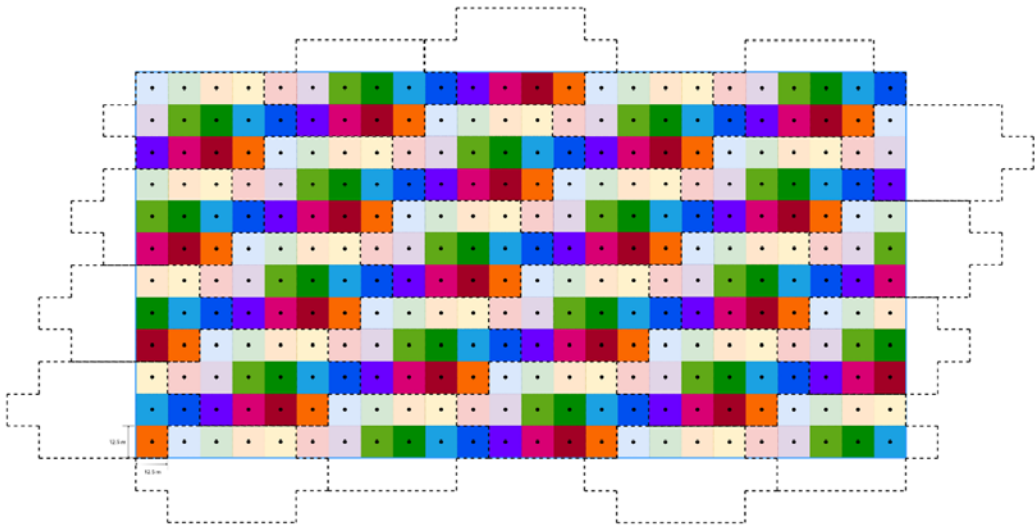


Рисунок 4.16 – Частотне планування в діапазоні 6 ГГц

Видно, що хоча в діапазоні 6 ГГц доступно більше каналів, більше стільників використовують один і той самий канал. Найгірша комірка показана синьою рамкою на рисунку 4.17.

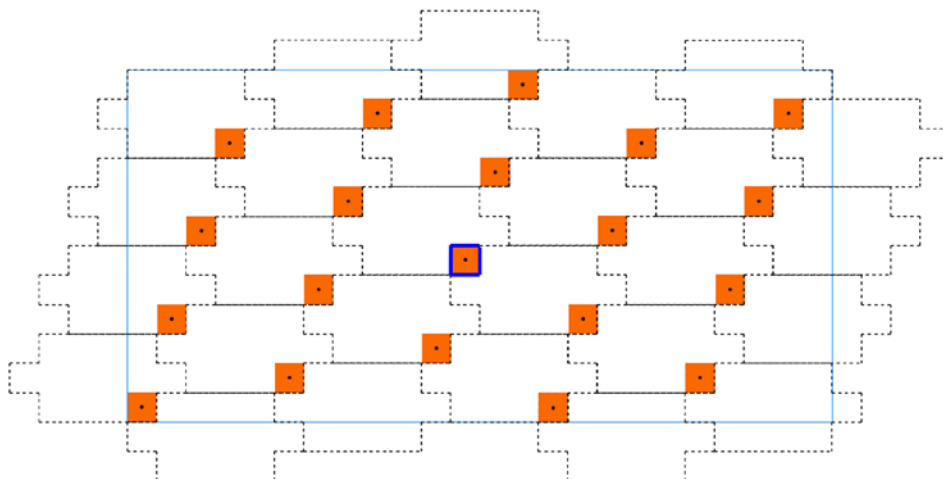


Рисунок 4.17 – Найгірша комірка в частотному плануванні діапазону 6 ГГц

Згідно з журналом, на жаль, найгірший стільник може чути повідомлення від усіх інших стільників, які працюють у тій самій комірці. Тому суперечки можуть виникати між суб'єктами щонайбільше з 20 осередків.

При такому розподілі каналів за один і той самий канал конкурують щонайбільше 20 стільників, що знову ж таки призводить до низької продуктивності найгіршого стільника, який не може підтримувати жоден робот.

4.5 Висновки до розділу 4

У четвертому розділі проведено дослідження нового діапазону 6 ГГц, який є цікавим як нова функція і має в 2,4 рази більшу пропускну здатність порівняно з діапазоном 5 ГГц. З новим обмеженням потужності в діапазоні 6 ГГц і спеціальними промисловими застосуваннями потрібно більш ретельне планування з точки зору розміру комірки, потужності передачі і частотного планування.

Продуктивність в сценаріях з однією точкою доступу не може бути легко досягнута на заводах з великими площами.

Згідно з остаточними характеристиками, які ми знайшли для Wi-Fi 6E, на фабриках з великою площею Wi-Fi 6E може мати значне падіння продуктивності, майже на 100%, з додатками, які вимагають затримки в послідовності обміну повідомленнями, якщо немає додаткового механізму, який забезпечує координацію між усіма точками доступу в різних осередках.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Підвищення ефективності корпоративних мереж шляхом впровадження частотного діапазону 6 ГГц» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

5.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Підвищення ефективності корпоративних мереж шляхом впровадження

частотного діапазону 6 ГГц» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	56	58	60
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		58,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 5.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	0	62	0
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	54	0	58
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	58,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [29]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (5.1)$$

де $k_{нов}$, $k_{теор}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{нов} = 58,0$, $k_{теор} = 58,0$ балів;

$0,6$ та $0,4$ – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 58,0 + 0,4 \cdot 58,00 = 58,00 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{нау}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності корпоративних мереж шляхом впровадження частотного діапазону 6 ГГц», даний рівень становить 58,00 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності корпоративних мереж шляхом впровадження частотного діапазону 6 ГГц», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

5.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [29]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=21$ дні.

$$Z_o = 12320,00 \cdot 44 / 21 = 25813,33 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
1. Керівник проекту	12320,00	586,67	44	25813,33
2. Ст. науковий співробітник	11980,00	570,48	42	23960,00
3. Інженер-дослідник телекомунікаційних систем	11520,00	548,57	42	23040,00
4. Консультант (аналітик служби цифрових інформаційних систем)	11980,00	570,48	5	2852,38
5. Аналітик з питань математичного моделювання процесів	11980,00	570,48	7	3993,33
6. Технік (без категорії)	6750,00	321,43	38	12214,29
Всього				91873,33

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Підвищення ефективності корпоративних мереж шляхом впровадження частотного діапазону 6 ГГц» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=6700,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [29];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_l = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,35 / (21 \cdot 8) = 59,22 \text{ грн.}$$

$$Z_{pl} = 59,22 \cdot 6,50 = 384,95 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
1. Встановлення офісного обладнання	6,50	2	1,10	59,22	384,95
2. Інсталяція програмного забезпечення	6,80	4	1,50	80,76	549,16
3. Компіляція програмних модулів	4,50	5	1,70	91,53	411,87
4. Відлагодження програмних модулів	2,10	5	1,70	91,53	192,21
5. Формування радіоелектронної моделі апаратного комплексу	5,80	5	1,70	91,53	530,86
6. Контроль ходу експериментів	8,30	3	1,35	72,68	603,27
7. Формування бази даних результатів дослідження	12,30	2	1,10	59,22	728,45
Всього					3400,76

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{доод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доод}}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де $H_{\text{доод}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 11%.

$$Z_{\text{доод}} = (91873,33 + 3400,76) \cdot 11 / 100\% = 10480,15 \text{ грн.}$$

5.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{доод}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (5.6)$$

де $H_{\text{зн}}$ – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (91873,33 + 3400,76 + 10480,15) \cdot 22 / 100\% = 23265,93 \text{ грн.}$$

5.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Підвищення ефективності корпоративних мереж шляхом впровадження частотного діапазону 6 ГГц».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (5.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 3,0 \cdot 220,00 \cdot 1,05 - 0 \cdot 0 = 693,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір канцелярський офісний А4	220,00	3,0	0	0	693,00
Папір для заміток А5	120,00	4,0	0	0	504,00
Начиння канцелярське	221,00	3,0	0	0	696,15
Органайзер офісний	205,00	4,0	0	0	861,00
Картридж для принтера HP-1600	2150,00	2,0	0	0	4515,00
Диск оптичний (CD-R)	18,00	2,0	0	0	37,80
FLASH-пам'ять (16 ГБ)	132,00	1,0	0	0	138,60
Всього					7445,55

5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Підвищення ефективності корпоративних мереж шляхом впровадження частотного діапазону 6 ГГц», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.8)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_e = 1 \cdot 19750,00 \cdot 1,1 = 21725,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Сервер корпоративної мережі	1	19750,00	21725,00
Роутер	1	11280,00	12408,00
Термінальне обладнання	1	14300,00	15730,00
Набір інтерфейсів частотного діапазону	1	1920,00	2112,00
Спеціалізовані радіоінтерфейси	2	6227,00	13699,40
Всього			65991,09

5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (5.9)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 4335,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 4768,50 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Обладання радіопередавача	1	4335,00	4768,50
Обладнання радіоприймача	1	3680,00	4048,00
Всього			8816,50

5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прог.і}} \cdot K_i, \quad (5.10)$$

де $C_{\text{инрг}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог.і}}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прог}} = 8300,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 8715,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Прикладний пакет проектування РЕА	1	8300,00	8715,00
Прикладний пакет обробки даних Statistica	1	7500,00	7875,00
База компютерних моделей радіомереж	1	6800,00	7140,00
База компютерних моделей радіосистем	1	6920,00	7266,00
Всього			30996,00

5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б}}{T_{г}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.11)$$

де $Ц_{б}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{г}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (54200,00 \cdot 2) / (3 \cdot 12) = 3011,11 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Обчислювальний комплекс	54200,00	3	2	3011,11
Обчислювально-графічна система моделювання	28600,00	3	2	1588,89
Персональний комп'ютер дослідника	36820,00	5	2	1227,33
Пристрій обміну даними	8320,00	3	2	462,22
Обладнання радіопередавача	4768,50	4	2	198,69
Обладнання радіоприймача	4048,00	4	2	168,67
Офісний пакет програмного забезпечення	8690,00	3	2	482,78
Приміщення лабораторії досліджень	400000,00	25	2	2666,67
Всього				9806,35

5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot \Pi_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (5.12)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 7,50$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,40 \cdot 320,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 960,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Обчислювальний комплекс	0,40	320,0	960,00
Обчислювально-графічна система моделювання	0,35	320,0	840,00
Персональний комп'ютер дослідника	0,26	320,0	624,00
Пристрій обміну даними	0,03	250,0	56,25
Обладнання радіопередавача	0,04	120,0	36,00
Обладнання радіоприймача	0,05	120,0	45,00
Сервер корпоративної мережі	0,08	250,0	150,00
Роутер	0,10	120,00	90,00
Термінальне обладнання	0,220	120,0	198,00
Всього			2999,25

5.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності корпоративних мереж шляхом впровадження частотного діапазону 6 ГГц» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cb} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cb}}{100\%}, \quad (5.13)$$

де H_{cb} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийнемо $H_{cb} = 22\%$.

$$B_{cb} = (91873,33 + 3400,76) \cdot 22 / 100\% = 20960,30 \text{ грн.}$$

5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (5.14)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийнемо $H_{cn} = 30\%$.

$$B_{cn} = (91873,33 + 3400,76) \cdot 30 / 100\% = 28582,23 \text{ грн.}$$

5.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_{\text{в}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{ив}}}{100\%}, \quad (5.15)$$

де $H_{\text{ив}}$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{\text{ив}} = 55\%$.

$$I_{\text{в}} = (91873,33 + 3400,76) \cdot 55 / 100\% = 52400,75 \text{ грн.}$$

5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{\text{нзв}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{нзв}}}{100\%}, \quad (5.16)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 100\%$.

$$B_{нзв} = (91873,33 + 3400,76) \cdot 100 / 100\% = 95274,09 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності корпоративних мереж шляхом впровадження частотного діапазону 6 ГГц» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{ood} + Z_n + M + K_v + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} B_{заг} = & 91873,33 + 3400,76 + 10480,15 + 23265,93 + 7445,55 + 65991,09 + 8816,50 + \\ & 30996,00 + 9806,35 + 2999,25 + 20960,30 + 28582,23 + 52400,75 + 95274,09 = \\ & = 452292,29 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.18)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta = 0,95$.

$$ZB = 452292,29 / 0,95 = 476097,15 \text{ грн.}$$

5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності корпоративних мереж шляхом впровадження частотного діапазону 6 ГГц» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t}, \quad (5.19)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo $I = 4$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n = 0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n = 1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n = 2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n = 3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n = 2$;

T_C – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_C = 3$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R = 4$; якщо результати роботи відповідають

відомому рівню, то $R = 3$; якщо нижче відомих результатів, то $R = 1$. Прийmemo $R = 4$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 476097,15$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,17$ років, (2 міс.).

Визначення показників I , n , T_C , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [29].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^2 \cdot 3 \cdot 4 / 476,1 \cdot 0,17 = 2,42.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Підвищення ефективності корпоративних мереж шляхом впровадження частотного діапазону 6 ГГц» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

5.4 Висновок до розділу 5

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності корпоративних мереж шляхом впровадження частотного діапазону 6 ГГц» складають 476097,15 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності корпоративних мереж шляхом впровадження частотного діапазону 6 ГГц» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Забезпечення безпеки праці є важливим завданням для забезпечення сталого соціально-економічного розвитку та якості життя громадян. Впровадження та дотримання норм охорони праці сприяють підвищенню продуктивності праці, зниженню витрат на медичний облік і лікування працівників, а також створюють позитивне робоче середовище. Важливо оцінити, що належне значення до питань охорони праці є необхідним у контексті інтеграції України в європейський простір, оскільки це відповідає стандартам та вимогам до умов праці. Захист працівників від небезпечних факторів на робочому місці є ключовою складовою у розвитку людського капіталу та забезпеченні сталого зростання економіки.

Під час виконання дослідження на тему «Підвищення шляхів ефективності корпоративних мереж шляхом впровадження частотного діапазону 6ГГц» на дослідника, згідно Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; підвищена чи понижена іонізація повітря; недостатня освітленість робочої зони; підвищена яскравість світла; понижена контрастність; пряма і відбита блискість.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження та розумове перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо розробку заходів щодо безпечного виконання поставленого завдання.

6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

6.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця

Раціональна організація робочого місця безпосередньо впливає на продуктивність праці та забезпечує зручність і комфорт працівників. Ефективне використання простору дозволяє зменшити меншу втрату часу та зусиль, деяких для виконання завдань. До того ж, оптимальна організація робочого місця зменшує ризик виникнення травм або захворювань, пов'язаних із незручною позицією чи неправильними рухами. Врахування принципів раціональної організації робочого місця є важливою складовою політикою охорони праці та підвищення загального рівня задоволеності працівників своєю роботою.

Роботодавець повинен забезпечити відповідність робочих місць стандартам комфорту та безпеки. Відповідно до НПАОП 0.00-7.15-18 площа одного робочого місця має бути не менше 6 м². У випадку, коли це необхідно, робочі місця співробітників, які працюють з комп'ютерами, можуть бути розділені перегородками висотою до 2 метрів. При розрахунку розміру приміщення та робочого місця на одному, також враховується наявність шаф, сейфів, тумб чи інших меблів та обладнання в кімнаті. У даному місяці площа становить 32,5 м², об'єм – 104 м³. В досліджуваному приміщенні працює 5 працівників, тому площа на одну особу становить 6,5 м², а об'єм – 20,8 м³, що відповідає встановленим вимогам щодо організації робочих місць.

Коректна організація простору, в якій працюють співробітники, дозволяє максимально використовувати його потенціал і уникнути негативних наслідків для здоров'я. Робоче місце дослідника має передбачати можливість розміщення додаткових пристроїв для роботи, зокрема принтера, колонки та сканера, і створити місце для зберігання документів. Проте важливо переконатися, що це не обмежує видимість екрану та не заважає працівникам. Відповідно до сучасних стандартів безпеки та здоров'я, важливо мати на увазі, що робочий

стіл та стілець повинні відповідати нормам та забезпечувати зручну робочу позицію. Робочий стілець працівника має бути підйомно-поворотним, з можливістю легкого регулювання висоти, а також здатним забезпечити належну підтримку та комфортне положення для працівника.

Під час виконання роботи забороняється:

виконувати обслуговування та ремонт комп'ютера на робочому місці працівника.;

виконувати ремонт або спробувати здійснити технічне налагодження комп'ютера без залучення фахівців, які мають відповідні навички та кваліфікацію;

проводити самостійні роботи з обслуговування комп'ютерної техніки, що може привести до можливих поломок або втрати даних.

накопичувати зайві предмети та деталі на робочому столі, що може заважати комфортному та продуктивному виконанню завдань;

використовувати монітори з нечітким зображенням та монітори, у яких наявні поламки екрану.

Створення комфортних умов праці та оформлення робочих місць на виробництві має велике значення для полегшення праці, підвищення його привабливості та позитивного впливу на продуктивність. Правильна робоча поза дослідника передбачає наступне:

стопи розміщуються на підлозі або на спеціальній основі для ніг. Використання підставки є обов'язковим для тих працівників, чії ноги не досягають підлоги при положенні стільці на тій висоті, яка забезпечує оптимальну робочу позицію;

стегна повинні бути паралельними до підлоги в горизонтальній площині;

передпліччя має бути розміщені вертикально;

лікть повинні бути зігнуті під кутом від 70° до 90° щодо вертикальної площини;

зап'ястя мають знаходитися під кутом не більше 20° відносно горизонтальної площини;

голову слід тримати під кутом від 15° до 20° відносно вертикальної площини.

При прийнятті на роботу кожен працівник зобов'язаний пройти медичний огляд і в подальшому проходити його (не рідше, ніж один раз кожні два роки). Проведення медичного огляду включає консультацію терапевта, невропатолога та офтальмолога, і ця процедура є обов'язковою для всіх працівників. Під час виконання дослідження було встановлено чіткий розклад регулярних перерв для відпочинку, додатково до обідньої перерви. Зазвичай такі перерви тривають від 10 до 15 хвилин і надаються раз на годину або дві, залежно від характеру та складності роботи. У будь-якому випадку роботодавець забезпечує такий робочий графік, щоб тривалість безперервної роботи за комп'ютером не перевищувала 4 роки. Додатково, для підтримки загального стану здоров'я та працездатності працівників, бажано виділити спеціальні приміщення для відпочинку та релаксації, які допоможуть зняти нервово-емоційне напруження, яке можна виникати під час роботи з комп'ютером.

6.1.2 Електробезпека приміщення

У досліджуваному приміщенні наявна групова трипровідна мережа для живлення персональних комп'ютерів, периферійних пристроїв, і обладнання, призначеного для обслуговування, ремонту та налагодження ПК. Ця мережа складається із трьох провідників: фазового, нульового робочого та нульового захисного. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення електропристроїв.

Для забезпечення електробезпеки необхідно дотримуватися ПУЕ. Основні причини, які можуть призвести до ураження працівника під час виконання роботи, включають:

- ймовірність дотику до металевих неструмопровідних частин, таких як корпус комп'ютера або периферійні пристрої. Ці частини можуть опинитись під напругою, якщо ізоляція їх пошкоджена;

– використання електричних приладів без дотримання встановлених правил і стандартів;

– відсутність інструктажу співробітників щодо правил електробезпеки та процедур у разі виникнення небезпеки.

Під час роботи з електричним обладнанням слід завжди перевіряти стан ізоляції та з'єднання, уникаючи пошкодження або торкання металевих деталей до струмоведучих елементів. Обов'язковою є періодична перевірка та технічне обслуговування всього електрообладнання для попередження можливих аварій.

Дотримання електробезпеки у приміщенні, де здійснювалося дослідження, важливе для запобігання ураженню електричним струмом, що досягається такими способами і заходами:

1. Ізоляція струмоведучих елементів комп'ютерів та їх периферійних пристроїв, з нарахуванням запобігання можливим випадковим контактам з ними.

2. Захисне заземлення для металевих неструмоведучих частин, що можуть опинитися під напругою в разі пошкодження ізоляції.

3. Інструктаж і навчання працівників правилам безпеки при роботі з електронікою. Це включає у себе інформування про потенційні ризики та навчання, як уникати їх.

Перевірка знань та дотримання правил безпеки, залежно від займаної посади та характеру роботи.

6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.2.1 Мікроклімат

Вплив мікроклімату виробничих приміщень на робочий процес полягає в забезпеченні комфортних умов і підтримці працездатності працівників. Параметри мікроклімату, такі як температура повітря, вологість, швидкість руху повітря, відіграють важливу роль у створенні оптимального робочого

середовища. Збільшена або знижена температура, недостатнє провітрювання, висока вологість чи сухе повітря можуть викликати дискомфорт та негативно вплинути на продуктивність праці працівників. Тому важливо виконувати нормативні вимоги та створювати оптимальний мікроклімат у приміщеннях, забезпечуючи комфорт для працівників і підтримуючи їх працездатність.

Мікроклімат виробничих приміщень нормується в залежності від категорії робіт по важкості і періоду року. Категорія виконуваних робіт під час виконання дослідження – 1а, допустимі значення параметрів мікроклімату наведені в таблиці. 6.1.

Період року	Параметр мікроклімату	Величина
Холодний	Температура повітря в приміщенні	21 ... 25 ° C
	Відносна вологість	40 ... 60%
	Швидкість руху повітря	до 0,1 м / с
Теплий	Температура повітря в приміщенні	22 ... 28 ° C
	Відносна вологість	40 ... 60%
	Швидкість руху повітря	0,1 ... 0,2 м / с

Таблиця 6.1 – Параметри мікроклімату

З метою забезпечення визначених параметрів мікроклімату виробничих приміщень використовується загальна система опалення та система вентиляції. Для кожної вентиляційної установки складено паспорт, який містить технічну інформацію та схему розташування установки.

6.2.2 Склад повітря робочої зони

Повітряне середовище має велике значення для життя людини, його фізичні та хімічні характеристики суттєво впливають на здоров'я та комфорт працівників. Фізичні параметри мікроклімату, такі як температура, вологість, швидкість руху повітря та тиск, відіграють важливу роль у створенні комфортних умов для праці. Крім того, іонний склад повітря, електромагнітні та акустичні поля також можуть впливати на самопочуття та продуктивність

людини. Забезпечення належних умов мікроклімату та контроль якості повітряного середовища є основними завданнями для забезпечення здоров'я та безпеки на робочому місці. Допустимі рівні шкідливих речовин, як визначено в ДСН 3.3.6.042-99, які можуть міститися в досліджуваному місці, наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Оксид азоту	5	2	3
Вуглекислий газ	3	1	4
Пил нетоксичний	25	10	4
Озон	0,16	0,03	1

Під час виконання дослідження із використанням ПК важливо, щоб повітря мало певний іонний склад. Рівні позитивних і негативних іонів у повітрі приміщень з ПК мають відповідати санітарно-гігієнічним нормам (табл. 6.3).

Таблиця 6.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється за допомогою системи вентиляції, регулярного провітрювання, та вологого прибирання.

6.2.3 Виробниче освітлення

Для забезпечення комфортних умов для зорової роботи, запобігання швидкій втомі очей, попередження професійних захворювань та нещасних

випадків, а також для підвищення продуктивності праці важливо, щоб виробнича освіта відповідала наступним вимогам:

1. Забезпечення необхідного рівня освітленості на робочій поверхні, який відповідає характеру зорової роботи та є не нижчим встановлених норм.
2. Уникнення засліплюючої дії як від самого джерела освітлення, так і від інших об'єктів, що потрапляють у поле зору.
3. Збереження сталого та рівномірного рівня освіченості виробничих приміщень, щоб уникнути постійної переадаптації очей.
4. Попередження виникнення глибоких і різких тіней на робочій поверхні, особливо тихих, які можуть змінюватися під час роботи.
5. Забезпечення достатнього контрасту між освітленою поверхнею та робочим об'єктом для зручного розрізнення деталей.
6. Забезпечення надійності та простоти обслуговування системи освітлення, а також врахування економічних та естетичних аспектів.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО при природному та сумісному освітленні (характеристика зорової роботи – високої точності згідно з ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення») зазначені у таблиці 2.4:

Таблиця 6.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнювання	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Високої точності	0,3 -0,5	III	г	великий	світлий	700	300	5	2	3	1,2

Для підвищення ефективності використання природного освітлення в приміщенні регулярно очищуються вікна від пилу та встановлені жалюзі. Щодо штучного освітлення, як джерела світла використані люмінесцентні лампи. Важливо, щоб світильники були розташовані рівномірно, із забезпеченням оптимальної освітленості на робочих поверхнях та у всьому приміщенні.

6.2.4 Виробничий шум

Шум впливає на організм людини не лише через безпосереднє подразнення слухового апарату, але також має вплив на центральну нервову систему. Це може призводити до різних порушень в роботі організму. Ефекти впливу шуму на організм людини можна умовно поділити на дві групи: специфічні, пов'язані з впливом шуму на органи слуху, і загальні (неспецифічні), які виникають в різних органах і системах організму, окрім слухового апарату.

Основним джерелом шуму в приміщенні, де виконувалася робота, є працююча офісна техніка. Рівні звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях, обладнаних ПК, повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.037-99 (див. таблицю 6.5).

Таблиця 6.5 - Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

На робочому місці рівень шуму є нижчим за нормований. У разі появи значного рівня шуму, використовують шумоізоляційні матеріали в інтер'єрі, зокрема меблі та обробка приміщень звукоізоляційними матеріалами, що може сприяти зниженню внутрішнього відбиття звуку. Додатково, може бути корисним оптимізувати розташування робочих місць, віддаливши їх від джерел

шуму або використовуючи перегородки для виділення тих зон, де шум може бути інтенсивнішим. Регулярні перерви для відпочинку та дотримання раціонального режиму праці та відпочинку також є задоцільними заходами зменшення впливу шуму на працівників.

6.2.5 Виробничі випромінювання

Комп'ютерні компоненти, що працюють на змінній напрузі та струмі, створюють змінні електричні та магнітні поля. Рівні цих полів регулюються чинними нормами України, зокрема Державними санітарними правилами та нормами ДСанПіН 3.3.2.007-98, а також європейським стандартом MPR II. У разі некоректної організації робочого місця джерелами електромагнітних полів можуть бути не тільки монітор, блок живлення та мережеві кабелі, але й периферійні пристрої.

Значення напруженості електростатичного поля на робочих місцях із ПК (як у зоні екрана дисплея, так і на поверхнях обладнання, клавіатури, друкувального пристрою) мають не перевищувати гранично допустимих (табл. 6.6).

Таблиця 6.6 – Допустимі параметри електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	10 В/м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	0,3 А/м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати:	для дорослих користувачів 20кВ/м для дітей 15кВ/м

Для зменшення впливу ЕМП на працівника необхідно дотримуватися раціонального режиму роботи та відпочинку, встановленого нормативними вимогами.

6.2.6 Психофізіологічні фактори

Психофізіологічні виробничі фактори – це фактори, що впливають на психофізіологічний стан людини в процесі праці. Вони включають в себе як фізичні (важка праця), так і психічні (нервово-психічне перевантаження, соціально-психологічні аспекти) фактори. Оцінка психофізіологічних факторів під час проведення дослідження здійснюється відповідно до Гігієнічної класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу.

Робоча поза: періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) та/або фіксованій позі (неможливість зміни взаєморозташування різних частин тіла відносно одна одної) до 25% часу зміни;

Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження:

Зміст роботи – творча діяльність, що вимагає вирішення складних завдань за відсутності алгоритму;

Сприймання інформації та їх оцінка – сприймання інформації з наступною корекцією дій та операцій;

Розподіл функцій за ступенем складності завдання – обробка, виконання завдання та його перевірка.

Сенсорні навантаження:

Зосередження (%за зміну) – до 5-75%;

Щільність сигналів (звукові за 1 год) – до 150;

Навантаження на слуховий аналізатор (%) – розбірливість слів та сигналів від 50 до 80 %;

Спостереження за екранами відеотерміналів (годин на зміну) – 4-6год.

Навантаження на голосовий апарат (протягом тижня) – від 16 до 20.

Емоційне навантаження:

Ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; Ступінь ризику для власного життя – вірогідний;

Режим праці:

Тривалість робочого дня – більше 8 год;

Змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

За зазначеними показниками важкості та напруженості праці, робота, яка виконується належить до допустимого класу умов праці (напруженість праці середнього ступеня).

6.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

6.3.1 Вплив радіації на організм людини

При вивченні дії випромінювання на організм людини встановлено такі особливості:

- навіть незначна кількість поглиненої енергії випромінювання спричинює глибокі біологічні зміни в організмі;
- наявність прихованого (інкубаційного) періоду дії іонізуючого випромінювання;
- випромінювання має генетичний ефект;
- органи живого організму мають різну чутливість до випромінювання;
- окремі організми неоднаково реагують на опромінювання;
- опромінювання залежить від частоти, одноразове опромінювання у великій дозі спричинює більш глибокі зміни.

Радіоактивні речовини потрапляють в організм людини при вдиханні зараженого повітря, із зараженою їжею чи водою, крізь шкіру, відкриті рани. Проникненню радіоактивних забруднень крізь шкіру і рани можна запобігти, дотримуючись певних заходів захисту.

Основним джерелом опромінювання людини є радіоактивні речовини, які потрапляють з їжею. Ступінь небезпеки забруднення радіонуклідами залежить від частоти вживання забруднених радіоактивними речовинами продуктів, а також від швидкості виведення їх з організму. Якщо радіонукліди, які потрапили в організм, однотипні з елементами, що споживає людина з їжею (натрій, калій, хлор, кальцій, залізо, марганець, йод та ін.), то вони швидко виводяться з організму разом з ними.

Окремі радіоактивні речовини концентруються в різних внутрішніх органах. Елементи, які акумулюються в м'яких тканинах організму, легко виділяються. Джерела α -випромінювання (радій, уран, плутоній), (3-випромінювання (стронцій, іпрітрій) і γ -випромінювання (цирконій) відкладаються в кістках у вигляді хімічно зв'язаних сполук з кістковою тканиною, тому важко виводяться з організму.

Деякі речовини харчових продуктів (пектинові, барвники) утворюють нерозчинні сполуки зі стронцієм, кобальтом, свинцем, кальцієм та іншими важкими металами, які не перетравлюються і виводяться з організму. Отже, ці речовини виконують радіозахисну функцію. Тому пектин, а також пектиномістки продукти (чорна смородина, агрус, полуниці та ін.), використовують у спеціальному харчуванні для виведення радіоактивних елементів з організму.

Первинним процесом дії радіоактивних речовин в організмі людини є іонізація. Збуджена при цьому енергія іонізуючого опромінювання передається на різні речовини організму людини. У разі дії на прості речовини (гази, метали та ін.) будь-яких змін фізико-хімічної природи у них не спостерігається. При дії на складні речовини, молекули яких складаються з багатьох різних атомів, вони розпадаються (дисоціація). Це так звана пряма дія на прості або складні речовини організму людини. Більш суттєву роль відіграє механізм непрямой дії іонізуючого випромінювання, під яким треба розуміти радіаційно-хімічні зміни у певній розчинній речовині, зумовлені продуктами радіолізу (розпаду) води.

В організмі людини знаходиться 60-70% води. В результаті іонізації молекули води під впливом радіоактивних речовин утворюються вільні

радикали гідроперекису (HO_2) і перекису (H_2O_2) водню, які як сильні окислювачі мають високу хімічну активність і вступають у реакції з білком, ферментами та іншими структурними елементами біологічної тканини, що призводить до зміни біологічних процесів в організмі. Внаслідок цього порушуються процеси обміну, пригнічується активність ферментних систем, затримується ріст тканин, виникають нові хімічні сполуки - токсини - сильні отрути. Все це призводить до порушення життєдіяльності окремих систем та організму в цілому. Патологічні процеси в організмі, у тому числі загибель клітин, ріст пухлин, пов'язують з хромосомними ураженнями соматичних клітин, причому рівень аутогенних ушкоджень хромосом зростає з віком людини.

6.3.2 Розрахунок коефіцієнта протирадіаційного захисту приміщення прийому їжі

Коефіцієнт протирадіаційного захисту приміщення, в якому перебуватимуть люди розраховуватимемо за формулою

$$K_3 = \frac{0,65 \times K_1 \times K_{CT}}{(1 - K_{Ш})(K_0 \times K_{CT} + 1) K_M}$$

Основні характеристики:

1. Зовнішні стіни з сандвіч панелей (30 см), маса $1 \text{ м}^2 - 54 \text{ кг}$.
2. Перегородки цегляні (12 см), маса $1 \text{ м}^2 - 216 \text{ кг}$.
3. Площа віконних прорізів: В-1 – $1,65 \text{ м}^2$.
4. Площа дверних прорізів: Д-2 – $1,9 \text{ м}^2$.
5. Висота підвіконників – 1 м;
6. Площа підлоги для розрахунку приміщення – 72 м^2 ;
7. Висота приміщення – 3 м;
8. Ширина зараженої ділянки, що примикає до приміщення – 12 м;
9. Маса 1 м^2 покриття – 290 кг/м^2 ;

10. Плоскі кути приміщення:

Кут $\alpha_1 = 53^\circ$. Проти кута розташовані:

- зовнішня стіна з сандвіч панелей (30 см) площею 18 м^2 ;
- 6 внутрішніх стін з цегли (12 см) площею 18 м^2 ;
- 5 внутрішніх стін з цегли (12 см) площею 18 м^2 з прорізом площею $4,75 \text{ м}^2$.

Кут $\alpha_2 = 127^\circ$. Проти кута розташовані:

- зовнішня стіна з сандвіч панелей (30 см) площею 36 м^2 з прорізом площею $6,6 \text{ м}^2$;
- 2 внутрішніх стіни з цегли (12 см) площею 36 м^2 з прорізом площею $1,9 \text{ м}^2$;
- внутрішня стіна з цегли (12 см) площею 36 м^2 ;
- внутрішня стіна з цегли (12 см) площею 36 м^2 з прорізом площею $7,6 \text{ м}^2$.

Кут $\alpha_3 = 53^\circ$. Проти кута розташована:

- 2 внутрішніх стіни з цегли (12 см) площею 18 м^2 з прорізом площею $1,9 \text{ м}^2$;
- 3 внутрішніх стіни з цегли (12 см) площею 18 м^2 з прорізом площею $4,75 \text{ м}^2$;
- зовнішня стіна з сандвіч панелей (30 см) площею 18 м^2 .

Кут $\alpha_4 = 127^\circ$. Проти кута розташована:

- зовнішня стіна з сандвіч панелей (30 см) площею 36 м^2 з прорізом площею $6,6 \text{ м}^2$.

Визначаємо масу 1 м^2 стін і перегородок, розташованих проти плоских кутів.

Кут $\alpha_1 = 53^\circ$.

Маса 1 м^2 зовнішньої стіни з сандвіч панелей (30 см) площею 18 м^2 ;

$$G_{\text{пр}} = 54 \text{ (кг)} .$$

Маса 1 м^2 6-ти внутрішніх стін з цегли (12 см) площею 18 м^2

$$G_{\text{пр}} = 216 \times 6 = 1296 \text{ (кг)}.$$

Маса 1 м² 5-ти внутрішніх стін з цегли (12 см) площею 18 м² з прорізом площею 4,75 м²

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{4,75}{18} = 0,26, G_{\text{пр}} = 5 \times 216(1 - 0,26) = 799,2 \text{ (кг)}.$$

Сумарна маса 1 м² стін і перегородок плоского кута α_1

$$G_{\Sigma}^1 = 799,2 + 1296 + 54 = 2149,2 \text{ (кг)}.$$

Кут $\alpha_2 = 127^\circ$.

Маса 1 м² зовнішньої стіни з сандвіч панелей (30 см) площею 36 м² з прорізом площею 6,6 м²

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{6,6}{36} = 0,18, G_{\text{пр}} = 54(1 - 0,18) = 44,3 \text{ (кг)}.$$

Маса 1 м² 2-х внутрішніх стін з цегли (12 см) площею 36 м² з прорізом площею 1,9 м²

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{1,9}{36} = 0,05, G_{\text{пр}} = 2 \times 216(1 - 0,05) = 410,4 \text{ (кг)}.$$

Маса 1 м² внутрішньої стіни з цегли (12 см) площею 36 м²

$$G_{\text{пр}} = 216 \text{ (кг)}$$

Маса 1 м² внутрішньої стіни з цегли (12 см) площею 36 м² з прорізом площею 7,6 м²

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{7,6}{36} = 0,21, G_{\text{пр}} = 216(1 - 0,21) = 170,6 \text{ (кг)}.$$

Сумарна маса 1 м² стін і перегородок плоского кута α_2

$$G_{\Sigma}^2 = 44,3 + 410,4 + 216 + 170,6 = 841,3 \text{ (кг)}.$$

Кут $\alpha_3 = 53^\circ$.

Маса 1 м² 3-х внутрішніх стін з цегли (12 см) площею 18 м² з прорізом площею 4,75 м²

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{4,75}{18} = 0,26, G_{\text{пр}} = 3 \times 216(1 - 0,26) = 479,5 \text{ (кг)}.$$

Маса 1 м² 2-х внутрішніх стін з цегли (12 см) площею 18 м² з прорізом площею 1,9 м²

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{1,9}{18} = 0,11, G_{\text{пр}} = 2 \times 216(1 - 0,11) = 384,5 \text{ (кг)}.$$

Маса 1 м² зовнішньої стіни з сандвіч панелей (30 см) площею 18 м²;

$$G_{\text{пр}} = 54 \text{ (кг)} .$$

Сумарна маса 1 м² стін плоского кута α_3

$$G_{\Sigma}^3 = 54 + 384,5 + 479,5 = 918 \text{ (кг)}.$$

Кут $\alpha_4 = 127^\circ$.

Маса 1 м² зовнішньої стіни з сандвіч панелей (30 см) площею 36 м² з прорізом площею 6,6 м²

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{6,6}{36} = 0,18, G_{\text{пр}} = 54(1 - 0,18) = 44,3 \text{ (кг)}.$$

Сумарна маса 1 м² стін плоского кута α_4

$$G_{\Sigma}^3 = 44,3 \text{ (кг)}.$$

Сумарні зведені маси стін і перегородок

$$G_{\Sigma}^1 = 2149,2 \text{ (кг/м}^2\text{)}; G_{\Sigma}^2 = 841,3 \text{ (кг/м}^2\text{)};$$

$$G_{\Sigma}^3 = 918 \text{ (кг/м}^2\text{)}; G_{\Sigma}^4 = 44,3 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

Сумарна маса стін і перегородок проти першого плоского кута приміщення більша за 1000 кг/м², тому при визначенні коефіцієнта K_1 , її не враховуватимемо

$$K_1 = \frac{360}{36 + \sum \alpha_i} = \frac{360}{36 + 303} = 1,06.$$

За мінімальною зведеною сумарною масою стін визначаємо коефіцієнт $K_{\text{ст}} = 2$.

За шириною будівлі визначаємо коефіцієнт, який враховує долю розсіювання випромінювання $K_{\text{ш}} = 0,47$ (висота приміщення складає 3 м).

Коефіцієнт K_0 , що враховує зниження поглинальної здатності зовнішніх стін за рахунок наявності в них віконних і дверних прорізів та проникнення в приміщення вторинного випромінювання, з врахуванням висоти від підлоги до вікон 1 м розрахуємо

$$K_0 = 0,8 \frac{S_0}{S_{\text{П}}} = 0,8 \frac{4,75}{72} = 0,05,$$

де $S_0 = 4,75 \text{ м}^2$ – загальна площа зовнішніх віконних і дверних прорізів приміщення; $S_{\text{п}} = 72 \text{ м}^2$ – площа підлоги приміщення.

Коефіцієнт, що враховує зниження дози радіації в приміщенні, розташованому в будівлі, від екранувальної дії сусідніх споруд $K_M=0,55$.

Тоді

$$K_3 = \frac{0,65 \times K_1 \times K_{CT}}{(1 - K_{III})(K_0 \times K_{CT} + 1)K_M} = \frac{0,65 \times 1,06 \times 2}{(1 - 0,47)(0,05 \cdot 2 + 1)0,55} = 4,3$$

Проведені для приміщення прийому їжі розрахунки показали, що коефіцієнт протирадіаційного захисту цього приміщення складає 4,3, тому воно не може бути використане для перебування людей в умовах радіаційного забруднення, а всі хто перебуватиме в ньому мають бути переведені в більш захищені приміщення або евакуйовані.

6.4 Висновки до розділу 6

В ході виконання було розглянуто технічні рішення з безпечного виконання робіт, зокрема: технічні рішення з організації робочого місця під час проектування та електробезпека приміщення; технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії; особливості організації оповіщення населення.

Отже основною метою даної частини розділу було дослідження безпеки роботи програмно-керованих інфокомунікаційних систем та розробка дієвих заходів по підвищенню безпеки роботи цієї системи в умовах надзвичайних ситуацій.

ВИСНОВКИ

За результатами досліджень у магістерській роботі було отримано такі основні результати:

Розроблені та проведені різні симуляції. Моделювання розглядало від простого періодичного трафіку до складного трафіку і охоплювало ідеальні сценарії з однією точкою доступу до великомасштабних сценаріїв з декількома точками доступу.

В результаті виявили, що наші результати майже відповідають нашій гіпотезі. Wi-Fi 6E перевершує застарілий Wi-Fi в декількох тестованих сценаріях і може обслуговувати велику кількість STA, особливо з ідеальним планувальником. Однак, Wi-Fi 6E також може бути гіршим від передачі OFDMA MU в деяких випадках або не може підтримувати продуктивність на заводах з великими площами. Для того, щоб оцінити нові характеристики Wi-Fi 6E, ми вважаємо, що в промислових сценаріях

1. Wi-Fi 6E може задовольнити безліч поширених промислових застосувань в обох діапазонах UL і DL.

2. Wi-Fi 6E перевершує Wi-Fi 5 в роботі з великою кількістю STA або трафіком з високою швидкістю передачі пакетів в UL.

3. Wi-Fi 6E може працювати гірше, ніж Wi-Fi 5, у специфічних промислових додатках зі строгими вимогами до затримок аж до мілісекундного рівня.

4. Wi-Fi 6E не завжди може отримати вигоду від передачі MU через проблеми з заповненням, спричинені величезною різницею в розмірах пакетів різних додатків.

5. Додаткові кадри в доступі до каналу Wi-Fi 6E можуть зробити його нестійким у деяких випадках співіснування між точками доступу.

6. На заводах з великими площами Wi-Fi 6E може мати значне падіння продуктивності, майже на 100%, з додатками, які вимагають затримки в

послідовності обміну повідомленнями, якщо не існує іншого механізму, який дозволяє координувати роботу точок доступу.

В економічній частині роботи були розраховані витрати на проведення досліджень та проведена оцінка важливості та наукової значимості роботи

В розділі "Охорона праці" проаналізовані умови праці в лабораторії для досліджень, виконано організаційно-технічні та санітарно-гігієнічні заходи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann, "Industry 4.0," *Business & information systems engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 239–242, 2014.
2. E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi, "A tutorial on ieee 802.11 ax high efficiency wlans," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 197–216, 2018.
3. E. H. Ong, J. Knecht, O. Alanen, Z. Chang, T. Huovinen, and T. Nihtilä, "Ieee 802.11 ac: Enhancements for very high throughput wlans," in *2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. IEEE, 2011, pp. 849–853.
4. B. Bellalta, "Ieee 802.11 ax: High-efficiency wlans," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 1, pp. 38–46, 2016.
5. O. Aboul-Magd et al., "Ieee 802.11 hew sg proposed csd," vol. 110, 2014. [Online]. Available: "<https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0169-01-0hew-ieee-802-11-hew-sg-proposed-csd.docx>"
6. Unlicensed use of the 6 ghz band; expanding flexible use in mid-band spectrum between 3.7 and 24 ghz. [Online]. Available: <https://www.fcc.gov/document/fcc-opens-6-ghz-band-wi-fi-and-other-unlicensed-uses-0>
7. G. Bianchi, L. Fratta, and M. Oliveri, "Performance evaluation and enhancement of the csma/ca mac protocol for 802.11 wireless lans," in *Proceedings of PIMRC'96-7th International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Communications*, vol. 2. IEEE, 1996, pp. 392–396.
8. E. Ziouva and T. Antonakopoulos, "Csma/ca performance under high traffic conditions: throughput and delay analysis," *Computer communications*, vol. 25, no. 3, pp. 313–321, 2002.
9. D. Åkerman and A. Jönsson, "Modeling, implementation and evaluation of ieee 802.11 ac in enterprise networks," 2016.

10. J. Goodman, A. G. Greenberg, N. Madras, and P. March, “Stability of binary exponential backoff,” *Journal of the ACM (JACM)*, vol. 35, no. 3, pp. 579–602, 1988.
11. Y. Cheng, D. Yang, H. Zhou, and H. Wang, “Adopting ieee 802.11 mac for industrial delay-sensitive wireless control and monitoring applications: A survey,” *Computer Networks*, vol. 157, pp. 41–67, 2019.
12. C. Ghosh et al. (2015) Fragmentation with mu operation. [Online]. Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1102-00-00ax-fragmentation-with-mu-operation.pptx>
13. P.-K. Huang et al. (2015) Mu-rtts/cts for dl mu. [Online]. Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0867-01-00ax-mu-rtts-cts-for-dl-mu.pptx>
14. R. M. Buehrer, “Code division multiple access (cdma),” *Synthesis Lectures on Communications*, vol. 1, no. 1, pp. 1–192, 2006.
15. Wi-fi 6e: Faster speed, lower latency and higher capacity. BROADCOM. [Online]. Available: <https://www.broadcom.com/info/wifi6e>
16. A. Varghese and D. Tandur, “Wireless requirements and challenges in industry 4.0,” in *2014 international conference on contemporary computing and informatics (IC3I)*. IEEE, 2014, pp. 634–638.
17. “Ieee 802 nendica report: Flexible factory iot: Use cases and communication requirements for wired and wireless bridged networks,” *IEEE 802 Nendica Report: Flexible Factory IoT: Use Cases and Communication Requirements for Wired and Wireless Bridged Networks*, pp. 1–48, 2020.
18. Wireless use cases and communication requirements in factories. NICT Wireless Networks Research Center Flexible Factory Project Team. [Online]. Available: <https://www2.nict.go.jp/wireless/en/ffpj-wp.html>
19. Y. Xiao, “Ieee 802.11 n: enhancements for higher throughput in wireless lans,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 12, no. 6, pp. 82–91, 2005.

20. J. S. Blanes, J. Berenguer-Sebastiá, V. Sempere-Paya, and D. T. Ferrandis, “802.11 n performance analysis for a real multimedia industrial application,” *Computers in Industry*, vol. 66, pp. 31–40, 2015.
21. A. Traßl, T. Hößler, L. Scheuevens, N. Franchi, and G. P. Fettweis, “Deriving an empirical channel model for wireless industrial indoor communications,” in *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2019, pp. 1–7.
22. A. F. Molisch, D. Cassioli, C.-C. Chong, S. Emami, A. Fort, B. Kannan, J. Karedal, J. Kunisch, H. G. Schantz, K. Siwiak et al., “A comprehensive standardized model for ultrawideband propagation channels,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 11, pp. 3151–3166, 2006.
23. E. Tanghe, W. Joseph, L. Verloock, L. Martens, H. Capoen, K. Van Herwegen, and W. Vantomme, “The industrial indoor channel: large-scale and temporal fading at 900, 2400, and 5200 mhz,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 7, pp. 2740–2751, 2008.
24. 3GPP, “Technical Sepction Group Radio Access Network; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 15),” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.901, 09 2019, version 15.1.0. [Online]. Available: https://panel.castle.cloud/view_spec/38901-f10/pdf/
25. T. Jiang, L. Tian, J. Zhang, Y. Zheng, Q. Wang, and J. Dou, “The impact of antenna height on the channel model in indoor industrial scenario,” in *2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops)*. IEEE, 2020, pp. 1–6.
26. Operation in u-nii bands – 802.11 channel plan (§15.407). [Online]. Available: https://www.naic.edu/~phil/rfi/u_niiband_802.11_aug16.pdf
27. Fcc part 15 power limits for wifi. [Online]. Available: https://www.scc-ares-races.org/mesh/doc/WiFi_Part_15_Power_Limits_v150424.pdf
28. M. D. Yacoub, A. F. de Toledo, P. R. Gomez, P. J. E. Jeszensky, and E. B. Feris, “Microcellular reuse pattern in an urban environment,” in *Ninth IEEE*

International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (Cat. No. 98TH8361), vol. 2. IEEE, 1998, pp. 645–649.

29. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

30. Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14_nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html

31. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php

32. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги - [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028

33. ДСан Пін 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/derz-nor4881.html>

34. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

35. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Електронний ресурс] – Режим доступу до сторінки: http://hrliga.com/index.php?module=norm_base&op=view&id=819

36. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

37. СанПіН 2.2.4.1294-03 «Фізичні фактори виробничого середовища. Гігієнічні вимоги до аероіонного складу повітря виробничих і громадських приміщень» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.ionization.ru/issue/iss5.htm>

38. СанПіН 2.2.4.1191-03 «Електромагнітні поля у виробничих умовах» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.vrednost.ru/2241191-03.php>

39. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

40. Сакевич В.Ф. / Основи розробки питань цивільної оборони в дипломних проектах. Навчальний посібник. — Вінниця : ВНТУ, — 2006. — 109 с.

ДОДАТКИ

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОРПОРАТИВНИХ МЕРЕЖ ШЛЯХОМ
ВПРОВАДЖЕННЯ ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ 6 ГГц
назва магістерської кваліфікаційної роботи

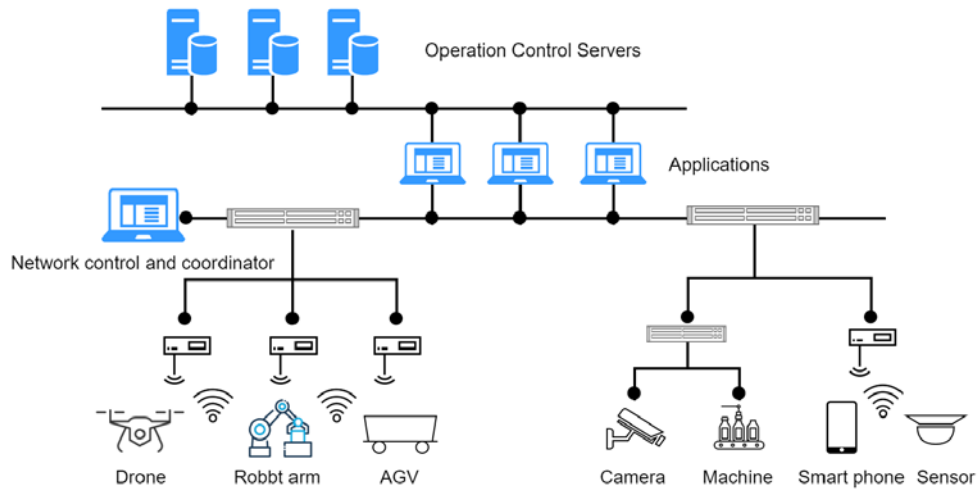


Рисунок 1 – Сегмент топології корпоративної мережі спеціального призначення

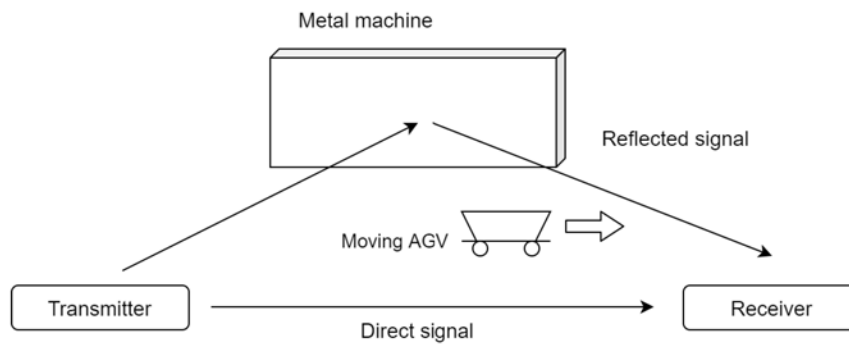


Рисунок 2 – Схема бездротового поширення сигналів з багатопроменивим ефектом

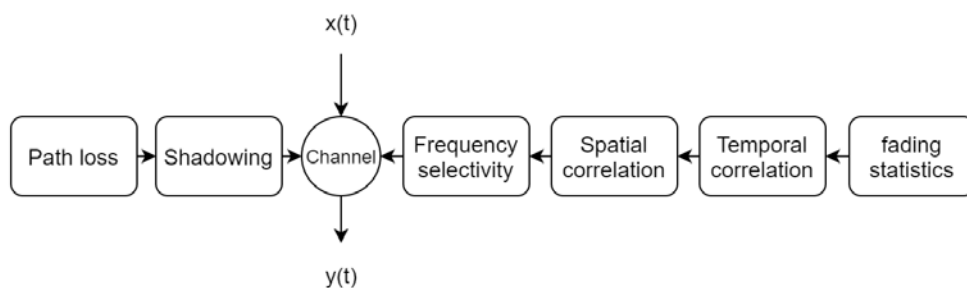


Рисунок 3 – Узагальнена модель безпроводного каналу передавання даних

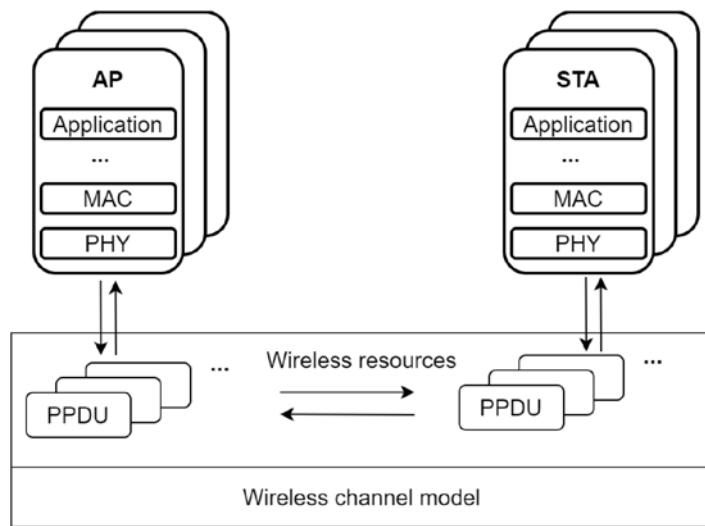


Рисунок 4 – Схема моделі системи Wi-Fi

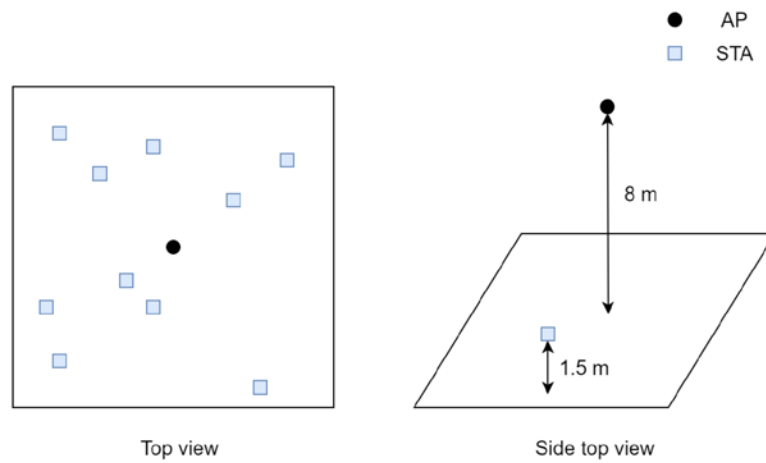


Рисунок 5 – Схема розгортання точок доступу та STA в кімнаті

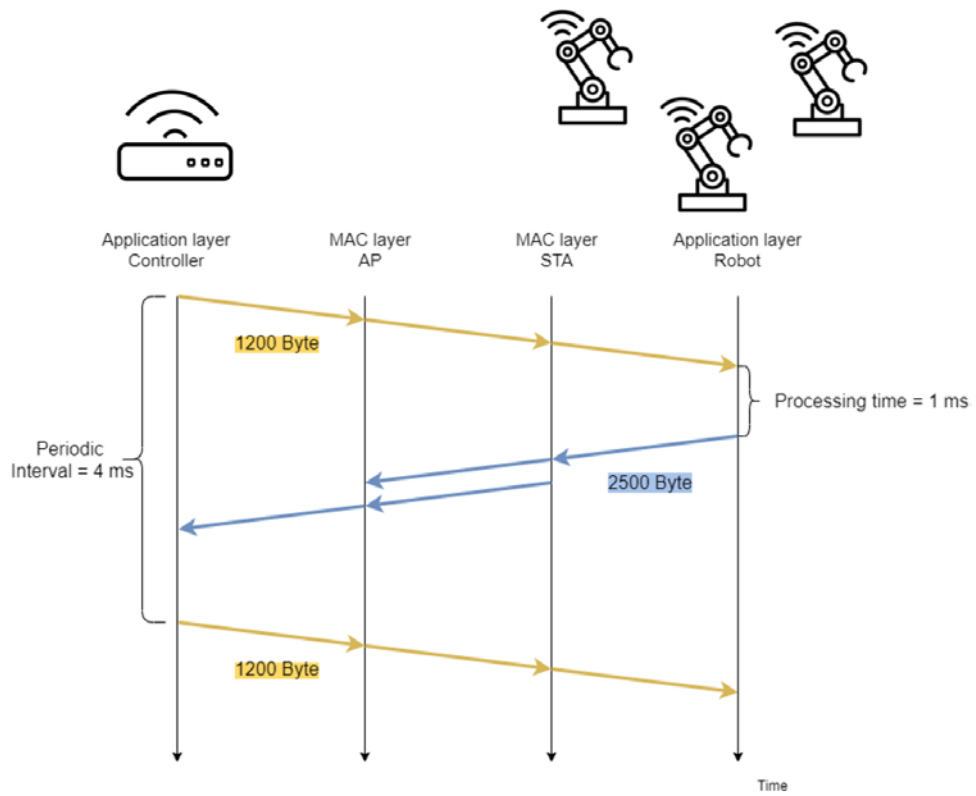


Рисунок 6 – Алгоритм роботи дистанційно керованої робототехнічної мережі

Додаток Б
(обов'язковий)

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Підвищення ефективності корпоративних мереж шляхом впровадження частотного діапазону 6 ГГц

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра інфокомунікаційних систем і технологій, факультет інформаційних електронних систем
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 97,1 % Схожість 2,9 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа відповідальна за перевірку


(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

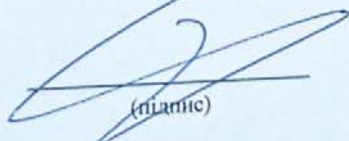
Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Братушко О.О.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Михалевський Д.В.
(прізвище, ініціали)